

**Science des eaux souterraines applicable
à l'Accord relatif à la qualité de l'eau
dans les Grands Lacs:
Rapport de situation**



**Science des eaux souterraines applicable à l'Accord relatif à la
qualité de l'eau dans les Grands Lacs :
Rapport de situation**

Résumé*

Préparé pour le Comité exécutif des Grands Lacs
par le sous-comité sur l'annexe 8

Ébauche
Octobre 2015

Auteurs (en ordre alphabétique) : Cindy Chu², Brewster Conant Jr.¹, Paulin Coulibaly³, Serban Danielescu^{4,5}, Matt Diebel⁶, Don Ford⁷, Rick Gerber⁸, Norm Grannemann⁹, Ken Howard², Matt Mitro⁶, David Hyndman¹⁰, Scott MacRitchie¹¹, Linda Nicks¹², Jeff Patzke¹³, Cam Portt¹⁴, Howard Reeves⁸, Clare Robinson¹⁵, James W. Roy⁴, Gayle Soo Chan¹⁶, John Spoelstra^{4,1}, Jon Sykes¹, Dale Van Stempvoort⁴, Mary Ellen Vollbrecht⁵, Kelly Warner⁸

Rédacteurs du rapport : Norm Grannemann⁸ et Dale Van Stempvoort⁴

¹Université de Waterloo, ²Université de Toronto, ³Université McMaster, ⁴Environnement Canada, ⁵Agriculture et Agroalimentaire Canada, ⁶Wisconsin Department of Natural Resources, ⁷Office de protection de la nature de Toronto et de la région, ⁸Conservation Authorities Moraine Coalition, ⁹Service géologique des États-Unis, ¹⁰Michigan State University, ¹¹Ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique de l'Ontario, ¹²Upper Thames River Conservation Authority, ¹³Ohio Environmental Protection Agency, ¹⁴Portt and Associates, ¹⁵Western University, ¹⁶Office de protection de la nature de la vallée de Credit

Membres du sous-comité de l'annexe 8 : Jon Allan, Michigan Office of the Great Lakes; Mike Baker, Ohio Environmental Protection Agency; Norm Grannemann, Service géologique des États-Unis (coprésident); Scott MacRitchie, Ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique de l'Ontario (remplaçant); Lisa Sealock, Environnement Canada; Ian Smith, Ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique de l'Ontario; Gayle Sookan, Office de protection de la nature de l'Ontario; Dale Van Stempvoort, Environnement Canada (coprésident); Mary Ellen Vollbrecht, Wisconsin Department of Natural Resources

*Pour des références, un glossaire des termes et plus de renseignements, veuillez consulter le rapport complet.

1. Contexte, portée et objectif du présent rapport

Le fait que les eaux souterraines se trouvent sous terre et « hors de la vue » est une des raisons pour lesquelles leur rôle dans le bassin des Grands Lacs a souvent été négligé, bien que le volume d'eaux douce souterraines dans le bassin équivaut à peu près au volume d'eau dans le lac Huron. Pendant de nombreuses années, les activités scientifiques concernant les eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs se sont concentrées sur la recherche d'eau potable. Au cours des dernières décennies, toutefois, des efforts ont été consacrés à la compréhension du rôle des eaux souterraines dans le bilan hydrologique général et dans les écosystèmes du bassin. On comprend de mieux en mieux la forte interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines, et une meilleure compréhension de cette interaction est nécessaire étant donné que la majorité de l'eau souterraine s'écoule vers l'eau de surface et finit par s'y déverser si elle n'est pas extraite. Cette interaction et cette connexion ont des répercussions sur nombre d'enjeux liés à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs.

Quand l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs (AQEGL) a été signé en 1972 par les gouvernements du Canada et des États-Unis (les « Parties »), l'importance des eaux souterraines n'était pas reconnue. Lorsque l'AQEGL a été modifié en 1978, l'annexe 16 a été ajoutée pour remédier à la « pollution causée par les eaux souterraines contaminées », mais on n'a fourni aucun processus officiel pour la production de rapports. En 1987, une annexe 16 modifiée exigeait des rapports sur les progrès. En 2012, une nouvelle annexe 8 a été élaborée pour aborder les eaux souterraines de façon plus globale et engager les Parties à coordonner les activités scientifiques liées aux eaux souterraines et les mesures de gestion. La première tâche consiste à « publier un rapport sur les données scientifiques pertinentes et disponibles concernant les eaux souterraines » d'ici février 2015 (le présent rapport). Le mandat plus général de l'annexe est de (1) « déterminer les répercussions des eaux souterraines sur l'intégrité chimique, physique et biologique des eaux des Grands Lacs »; (2) « analyser les contaminants, y compris les éléments nutritifs dans les eaux souterraines, provenant à la fois des sources ponctuelles et diffuses, qui ont des répercussions sur l'eau des Grands Lacs »; (3) « évaluer les lacunes en matière de renseignements et les besoins scientifiques liés aux eaux souterraines afin de protéger la qualité de l'eau des Grands Lacs »; et (4) « analyser d'autres facteurs, tels que les changements climatiques, qui touchent de façon individuelle ou de façon cumulative les répercussions des eaux souterraines sur la qualité de l'eau des Grands Lacs ».

Le présent rapport décrit la façon dont le flux naturel d'eaux souterraines vers les Grands Lacs et leurs affluents peut améliorer la qualité et la quantité d'eau et fournir des habitats essentiels dans les écosystèmes des Grands Lacs. Il décrit également la façon dont les eaux souterraines peuvent être un transmetteur (vecteur) de contaminants et de quantités excessives d'éléments nutritifs, qui proviennent de sources ponctuelles et diffuses, dans les Grands Lacs. En plus du flux direct d'eaux souterraines qui transportent des contaminants et des éléments nutritifs dans les Grands Lacs, le flux d'eaux souterraines vers les cours d'eau qui s'écoulent dans les Grands Lacs doit également être pris en considération, car l'écologie et les habitats des cours d'eau sont interreliés à l'écologie des Grands Lacs (par exemple, le frai et la migration des poissons).

2. Interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines

Les eaux souterraines sont de plus en plus reconnues comme un élément important du bilan hydrologique des Grands Lacs et du maintien de l'intégrité chimique, physique et biologique du bassin des Grands Lacs. On évalue que l'émergence directe et indirecte des eaux souterraines dans les Grands Lacs contribuent à hauteur de 2,7 % et de 42 % (respectivement) aux apports d'eau dans les Grands Lacs, et que les eaux souterraines représentent environ 70 % de l'écoulement fluvial dans les cours d'eau qui font partie du bassin.

Il existe des échanges entre les eaux souterraines et les plans d'eau de surface, y compris les cours d'eau, les lacs et les milieux humides. Cette interaction se produit généralement au moment de l'émergence d'eau souterraine, incluant l'apport du débit de base à l'écoulement fluvial, qui maintient le débit fluvial et les niveaux des plans d'eau intérieurs, en particulier pendant les périodes de sécheresse. L'alimentation de l'aquifère, où les eaux de surface pénètrent dans le sous-sol, peut également être l'occasion d'échanges avec les eaux souterraines. Ces échanges surviennent dans les zones de transition, qui sont des volumes situés dans des lits de cours d'eau, des lits de lac, des milieux humides et des matériaux géologiques adjacents, où les caractéristiques passent d'un système dominé par des eaux souterraines à un système dominé par des eaux de surface. La nature des échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface est régie par des propriétés hydrauliques (y compris les gradients) qui déterminent le sens de l'écoulement, et par la conductivité des matériaux géologiques souterrains, qui détermine la capacité de ces matériaux à transmettre l'eau.

Les plans d'eau de surface peuvent gagner ou perdre de l'eau dans les zones d'échange entre l'eau souterraine et l'eau de surface. Un cours d'eau absorbant reçoit l'émergence d'eau souterraine, et un cours d'eau infiltrant recharge le sous-sol. Les échanges sont complexes et variables sur des échelles spatiales allant de quelques centimètres à des dizaines de kilomètres. À l'échelle régionale, l'émergence d'eau souterraine est contrôlée par la topographie, les pentes des cours d'eau et la géologie sous-jacente. Dans chaque tronçon d'un cours d'eau, l'émergence des eaux souterraines varie en fonction de la composition des sédiments, de la topographie du lit du cours d'eau, des tracés des méandres, de la présence de matière organique à grain fin et de la hauteur d'eau par rapport au niveau supérieur de la nappe phréatique. L'eau des cours d'eau peut pénétrer dans les sédiments du lit du cours d'eau, les traverser horizontalement, potentiellement se mélanger à l'eau souterraine puis revenir dans le cours d'eau plus en aval. Ces zones de transition (appelées zones hyporhéiques) ont des caractéristiques hydrologiques, biologiques et géochimiques uniques et ont également le potentiel d'atténuer les contaminants (sections 3 et 4). Les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface varient également au fil du temps, avec les changements saisonniers dans les précipitations et l'évapotranspiration qui ont une incidence sur les niveaux des eaux souterraines. Les eaux de ruissellement provenant des pluies et de la fonte des neiges peuvent faire augmenter les niveaux d'eau et causer des inversions de gradients hydrauliques et, par conséquent, de la nature de l'échange entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Pendant la période de pointe de l'écoulement fluvial, l'eau de surface se déplace vers les rives adjacentes et se stocke dans les berges, puis cette eau stockée peut par la suite retourner dans le cours d'eau lorsque le niveau d'eau diminue; des inversions semblables se produisent le long des rives de lacs où les vents de tempête peuvent changer les niveaux d'eau de surface.

Émergence directe et indirecte d'eau souterraine dans les Grands Lacs.

La contribution des eaux souterraines à un des Grands Lacs est directe quand l'émergence se produit par le lit du lac, et indirecte quand les eaux souterraines passent dans des cours d'eau ou des milieux humides qui s'écoulent dans les Grands Lacs. La plupart des eaux souterraines suivent des voies d'écoulement courtes (à l'échelle locale) à travers des unités géologiques peu profondes, principalement des dépôts glaciaires (déposés par la glace ou de l'eau de fonte de glace). Les estimations des émergences directes d'eaux souterraines pour chacun des Grands Lacs comptent pour environ 0,1 % à 2,7 % des apports totaux, et l'émergence a tendance à se concentrer dans les zones côtières. D'après la modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine pour l'ensemble du bassin versant du lac Michigan, on estime que 1,1 % de l'apport total dans le lac provient directement de l'émergence d'eau souterraine. Le principal apport d'eau souterraine dans les Grands Lacs vient de l'émergence indirecte dans les cours d'eau affluents qui représente, selon les estimations, 22 % à 43 % de l'apport total d'eau dans ces lacs (à l'exception de l'écoulement entre ces lacs par l'entremise de voies interlacustres). De grandes incertitudes entourent l'ensemble de ces estimations, et des recherches supplémentaires sont nécessaires afin de mieux quantifier l'émergence directe et indirecte d'eau souterraine dans les Grands Lacs.

Lien entre l'émergence d'eau souterraine et la qualité de l'eau.

L'eau souterraine qui s'écoule peut être relativement pure et améliorer la qualité de l'eau de surface, mais peut également être contaminée et nuire à la qualité de l'eau de surface (voir les sections 3, 4 et 5). Les effets néfastes peuvent découler des concentrations de contaminants dans les eaux souterraines qui émergent ou de la charge massique totale des substances provenant des eaux souterraines. Pour évaluer les effets sur le milieu récepteur, il faut connaître la qualité et la quantité de l'eau, les voies d'émergence de l'eau et le rôle des processus d'atténuation possibles dans la zone de transition (voir les sections 3 et 4). L'émergence d'eau souterraine permet souvent de tempérer les eaux de surface, fournissant ainsi des aires de frai et un habitat propice (refuge thermal) pour le poisson (section 4). Les constituants présents dans l'eau souterraine peuvent atténuer le pH des eaux de surface ou fournir des éléments nutritifs qui ont une incidence sur la croissance des macrophytes et d'autres formes de végétation aquatique. Les différents régimes d'émergence fournissent des habitats de premier choix pour les organismes benthiques et hyporhéiques et améliorent la biodiversité.

Répercussions humaines sur les échanges entre les eaux souterraines et de surface dans le bassin des Grands Lacs.

Les activités humaines ont une incidence sur l'échange entre les eaux souterraines et de surface. La quasi-totalité des eaux souterraines se dirigent vers les eaux de surface et finiront par s'y déverser, y compris les eaux souterraines contaminées, à moins qu'elles soient extraites. Les prélèvements d'eaux souterraines (p. ex. le pompage pour l'approvisionnement en eau) peuvent entraîner une infiltration à partir des plans d'eau de surface ou réduire le flux d'eau souterraine vers les plans d'eau de surface, ce qui pourrait abaisser les niveaux des plans d'eau ou les assécher. L'urbanisation et les changements dans l'utilisation des terres modifient les taux de recharge de l'aquifère et le ruissellement de surface dans les cours d'eau. Le changement climatique d'origine anthropique modifie la configuration des précipitations, l'alimentation de l'aquifère, les températures des eaux souterraines et les eaux de ruissellement (section 7).

Besoins scientifiques prioritaires concernant l'échange entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

- Il est nécessaire d'avoir des outils pour caractériser adéquatement l'hétérogénéité spatiale et la variabilité temporelle dans les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface à des échelles locales afin de créer des modèles et de faire des prévisions à l'échelle régionale.
- Il faut quantifier de façon exacte les émergences d'eaux souterraines vers les eaux de surface.
- Il faut définir les voies d'écoulement importantes des eaux souterraines vers les eaux de surface et délimiter les zones d'émergence d'eaux souterraines.
- Il faut déterminer les relations essentielles entre l'émergence des eaux souterraines et la santé de l'écosystème aquatique.
- Il faut caractériser et comprendre le rôle des processus de la zone de transition sur la qualité des eaux de surface.

3. Eaux souterraines et contaminants dans les Grands Lacs

Comme il est mentionné à la section 2, les échanges entre les eaux souterraines et de surface peuvent avoir des effets positifs sur la qualité des eaux de surface dans le bassin des Grands Lacs. Les apports en eaux souterraines non contaminées peuvent réduire les concentrations de contaminants dans les eaux de surface en les diluant. Dans de tels cas, les zones d'émergence des eaux souterraines peuvent faire office de refuge pour la vie aquatique. De plus, l'eau de surface contaminée qui pénètre dans les lits des cours d'eau et retourne ultérieurement dans les eaux de surface peut avoir une charge réduite en contaminants en raison des processus d'atténuation dans la subsurface. En effet, la zone hyporhéique a été surnommée le « foie de la rivière ».

Les eaux souterraines peuvent également transporter des contaminants dans les eaux de surface. La préoccupation peut porter sur les concentrations de contaminants dans l'émergence d'eau souterraine ou la charge massique totale des substances provenant de l'eau souterraine. Les eaux souterraines peuvent être contaminées par divers produits chimiques et d'autres substances (y compris des mélanges), notamment des éléments nutritifs, des sels (p. ex. sels de voirie), des métaux, des hydrocarbures pétroliers, des additifs et des solvants chlorés, des radionucléides, des produits pharmaceutiques et d'autres nouveaux contaminants, des pesticides et des agents pathogènes. La contamination des eaux souterraines peut survenir à la suite de rejets accidentels ou intentionnels, de rejets localisés (source ponctuelle) ou de vaste étendue (source diffuse), de rejets uniques ou de rejets continus, et les contaminants peuvent être des substances synthétiques ou présentes à l'état naturel qui sont rejetées par les activités humaines (p. ex. sel de voirie). Les contaminants que l'on retrouve fréquemment dans les eaux souterraines sont généralement des contaminants dont l'usage est répandu ou qui sont communs dans l'environnement, qui sont solubles dans l'eau et qui ont des propriétés chimiques leur permettant de se déplacer librement dans les matériaux souterrains. De nombreux contaminants suivent également d'autres voies d'entrée dans les eaux de surface, ce qui peut obscurcir les apports en eaux souterraines. Les eaux souterraines urbaines ont souvent des mélanges complexes de contaminants et de voies d'entrée.

Les incidents de contamination des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs sont assez courants et bien connus, et un grand nombre de bases de données gouvernementales (y compris celles générées par les programmes de surveillance) et d'ouvrages scientifiques publiés contiennent des renseignements sur ces incidents. Cependant, il est probable qu'une grande partie de la contamination des eaux souterraines passe inaperçue.

Les contaminants transportés par les eaux souterraines peuvent nuire à l'utilisation des eaux de surface pour l'approvisionnement en eau ou la consommation de poisson (en raison de la bioaccumulation des contaminants) ou contribuer à la prolifération d'algues qui rendent ces eaux de surface impropres aux activités récréatives. Le risque que les contaminants posent dépend de l'étendue et de la répartition des sources de contaminants, de leur devenir et de leur facilité de déplacement vers des récepteurs et de leur toxicité ou d'autres effets indésirables. La qualité de l'eau et les écosystèmes des Grands Lacs peuvent être touchés par l'émergence directe à travers les lits de lacs et par l'émergence indirecte dans des affluents et des plans d'eau reliés (section 2). Le transport des eaux souterraines peut également être une source à long terme de contaminants ou d'éléments nutritifs qui sont principalement stockés dans la subsurface et renvoyés lentement dans l'eau de surface. Cette source potentielle à long terme de contaminants ou d'éléments nutritifs doit être prise en considération au moment d'évaluer l'efficacité prévue des mesures de gestion conçues pour améliorer la qualité des eaux de surface et pourrait être le facteur limitant qui empêche un rétablissement complet.

Les eaux souterraines peu profondes sont plus à risque que les eaux souterraines profondes d'être polluées par des contaminants. Les mécanismes d'atténuation des contaminants des eaux souterraines comprennent la sorption sur des surfaces solides, la précipitation de minéraux, la décroissance radiogénique, la dégradation microbienne, les réactions abiotiques, la volatilisation et l'absorption par des organismes (y compris les plantes). Certains de ces processus peuvent s'intensifier dans les zones de transition et les zones d'émergence des eaux souterraines, mais ces zones fournissent également des habitats à une grande variété d'organismes benthiques et interstitiels, qui sont donc vulnérables aux effets nocifs des eaux souterraines contaminées. Les organismes qui vivent dans des zones d'émergence d'eau souterraine peuvent être exposés à des concentrations élevées de contaminants des eaux souterraines avant la dilution par le mélange avec l'eau de surface. Par opposition, les organismes vivant dans les zones hyporhéiques des cours d'eau ou dans les zones de jet de rive des lacs pourraient profiter d'une dilution avec l'eau de surface qui y pénètre. L'exposition à d'autres contaminants provenant des eaux souterraines peut se produire dans la colonne d'eau de surface ou par contact ou ingestion de sédiments, de détritiques ou d'organismes benthiques contaminés. Les panaches de contaminants dans l'eau souterraine qui émerge ont souvent de faibles teneurs en oxygène dissous, ce qui peut nuire aux écosystèmes

aquatiques. La nature unique du biote et les scénarios possibles d'exposition indésirable dans les zones de transition ont incité l'Agence des États-Unis pour la protection de l'environnement (USEPA) et Environnement Canada à émettre une directive pour l'évaluation de ces zones dans les évaluations des risques écologiques.

Peu de documents dans la documentation scientifique ou dans les rapports gouvernementaux (p. ex. relativement aux secteurs préoccupants) fournissent des renseignements pertinents sur l'émergence d'eaux souterraines contaminées dans les plans d'eau de surface du bassin des Grands Lacs. Bon nombre de ces documents portent sur une contamination localisée et mettent l'accent sur le devenir et les processus de transport; il y a beaucoup moins de renseignements sur les charges et les effets cumulatifs à de plus grandes échelles. Par conséquent, on ne connaît pas les endroits où se produisent les pires émergences d'eaux souterraines contaminées dans les eaux de surface du bassin des Grands Lacs, ni leur corrélation avec les écosystèmes aquatiques sensibles ou la mesure dans laquelle la contamination s'accumule dans les sédiments dans le bassin en raison des apports en eaux souterraines. De plus, on ne sait pas de quelle façon les émergences d'eau souterraine contaminée vers l'eau de surface changeront avec le temps. La possibilité que les contaminants des eaux souterraines atteignent l'eau de surface peut être estimée à l'aide des données relatives aux eaux souterraines et de modèles conceptuels ou numériques, mais la détermination des zones d'émergence en tant que telles (zone de transition ou plan d'eau) exige des mesures directes sur le terrain en raison des incertitudes dans les processus d'atténuation et des variations à petite échelle dans les modèles d'écoulement de l'eau souterraine. L'évaluation des effets de l'émergence d'eau souterraine contaminée en mesurant l'augmentation des concentrations de contaminants (ou les indicateurs correspondants) dans les plans d'eau de surface échoue généralement en raison de la dilution ou d'autres processus d'atténuation. Souvent, il peut s'avérer nécessaire de prélever des échantillons directement dans les eaux souterraines qui émergent dans les sédiments sous le plan d'eau de surface, où l'on retrouve les expositions et les concentrations maximales. Diverses méthodes d'échantillonnage, lorsqu'elles sont combinées avec les mesures d'émergence des eaux souterraines, peuvent être utilisées pour évaluer les flux de contaminants dans les eaux de surface.

Besoins scientifiques prioritaires liés aux effets des contaminants dans les eaux souterraines sur la qualité de l'eau des Grands Lacs.

- Compiler des renseignements sur les sources de contaminants des eaux souterraines qui menacent les eaux de surface dans le bassin.
- Déterminer les meilleures méthodes de détection et d'évaluation de la contamination des eaux souterraines qui émergent dans les plans d'eau de surface.
- Améliorer l'évaluation du potentiel d'assainissement de la subsurface (en particulier la zone de transition).
- Déterminer la sensibilité des organismes de la zone de transition aux variations de la qualité et de l'émergence des eaux souterraines.
- Évaluer les effets sur l'environnement des contaminants des eaux souterraines.
- Déterminer les flux de contaminants provenant des eaux souterraines à l'échelle régionale dans les eaux des Grands Lacs.

4. Eaux souterraines et éléments nutritifs dans les Grands Lacs

L'excès d'éléments nutritifs dégrade la qualité de l'eau dans le bassin des Grands Lacs en stimulant la croissance excessive d'algues et de macrophytes (eutrophisation). Ce phénomène peut entraîner la destruction de l'habitat du poisson et d'espèces sauvages, la perte de la diversité des espèces et des effets néfastes sur l'utilisation de l'eau par les humains, notamment les activités récréatives, le tourisme, les pêches et l'approvisionnement en eau potable. La charge excessive en polluants phosphorés constitue un des principaux facteurs à l'origine de l'eutrophisation dans les Grands Lacs. Dans certaines conditions, l'excès d'azote, de silice et de fer stimule également la croissance des algues dans les Grands Lacs.

La gestion de la charge en éléments nutritifs dans les Grands Lacs s'est concentrée principalement sur le contrôle des intrants provenant de sources ponctuelles (p. ex. usines de traitement des eaux usées), sur l'interdiction des détergents phosphatés et sur la mise en œuvre de pratiques de gestion bénéfique agricoles. Les eaux souterraines sont souvent définies comme étant une source diffuse potentielle d'éléments nutritifs, mais le rôle des eaux souterraines demeure mal compris, en partie parce qu'il est difficile de quantifier la charge en éléments nutritifs provenant des eaux souterraines dans les eaux de surface.

L'azote et le phosphore subissent tous deux des cycles dans l'environnement et se présentent sous des formes différentes en tant qu'éléments nutritifs, qui ont une mobilité différente dans les eaux souterraines. Le nitrate, qui est très soluble et mobile dans les eaux souterraines, est l'un des contaminants les plus omniprésents dans les eaux souterraines. Le processus d'atténuation dominant du nitrate est la dénitrification (réduction du nitrate en azote gazeux). La dénitrification se produit dans des conditions anaérobies, qui existent souvent dans les zones de transition près de l'interface entre les eaux souterraines et les eaux de surface, y compris les zones riveraines et les zones hyporhéiques. Par conséquent, ces zones de transition peuvent avoir un effet disproportionné sur la régulation des flux d'azote des eaux souterraines vers les eaux de surface.

L'orthophosphate est la forme la plus importante de phosphore dans les eaux souterraines et peut réagir avec des cations pour former des minéraux stables, s'adsorber aux sédiments ou être absorbé par des plantes et converti en phosphore organique. À cause de la tendance du phosphore à s'accumuler dans les sédiments, on considère généralement que l'orthophosphate n'est pas mobile dans les eaux souterraines et que le ruissellement de surface et l'érosion des sédiments dominent la charge en polluants phosphorés dans les eaux de surface; toutefois, de plus en plus d'éléments probants indiquent que dans certaines conditions, l'orthophosphate peut être mobile dans les eaux souterraines. L'orthophosphate est plus mobile dans les aquifères ayant un pH élevé, une teneur élevée en matière organique, une faible teneur en oxyde métallique et des conditions anoxiques.

Les concentrations d'éléments nutritifs dans les eaux souterraines varient considérablement en fonction des pratiques d'utilisation des terres, des caractéristiques du paysage et des conditions souterraines. Les concentrations de nitrate sont souvent élevées dans les zones urbaines et agricoles; toutefois, les concentrations de phosphore et d'autres formes d'azote sont en général peu élevées dans la plupart des régions. Dans les zones riveraines, les processus géochimiques réduisent généralement les concentrations en nitrate et augmentent les concentrations en phosphore dans les eaux souterraines avant leur émergence dans les eaux de surface; toutefois, peu de puits de surveillance sont situés dans ces régions pour mesurer ces effets. Par conséquent, les données de surveillance existantes ne fournissent probablement pas un aperçu complet des éléments nutritifs qui se retrouvent véritablement dans l'eau de surface.

Sources d'éléments nutritifs dans les eaux souterraines.

Comme environ 35 % des terres du bassin des Grands Lacs sont des terres agricoles, les pratiques agricoles sont une source importante d'éléments nutritifs pour les aquifères dans le bassin. Les taux d'application d'engrais à base de phosphore ont légèrement diminué au cours des dernières années, mais les taux d'épandage d'engrais azotés continuent d'augmenter de façon constante. Les activités d'élevage du bétail en milieu fermé sont particulièrement préoccupantes en raison de la grande quantité de fumier produite et éliminée au moyen de l'épandage. Un grand nombre de sources non agricoles apportent des éléments nutritifs; par conséquent, les concentrations de nitrate dans les eaux souterraines sont parfois plus élevées dans les zones urbaines que dans les zones agricoles environnantes. Parmi les sources non agricoles, mentionnons les fosses septiques, les canalisations d'égout souterraines qui fuient dans les zones urbaines (section 6), l'utilisation d'engrais non agricoles et les sites d'enfouissement municipaux et industriels, en particulier les sites d'enfouissement fermés non équipés de membrane d'étanchéité, dont bon nombre sont situés le long des rives et des affluents des Grands Lacs.

Émergence des éléments nutritifs de l'eau souterraine vers l'eau de surface.

Les dépôts glaciaires peu profonds sont plus vulnérables à la contamination par les éléments nutritifs (section 2). L'émergence d'eau souterraine peut avoir des effets bénéfiques ou néfastes sur la qualité de l'eau dans les affluents (sections 2 et 3). Les effets sont plus forts pendant les périodes de débit d'étiage, lorsque le débit de base est soutenu principalement par l'émergence des eaux souterraines; toutefois, la contribution de la charge en éléments nutritifs des eaux souterraines à la qualité de l'eau des cours d'eau du bassin des Grands Lacs n'est pas bien comprise. Une partie importante des nitrates dans les cours d'eau pourrait provenir des eaux souterraines. Les charges de phosphore provenant des eaux souterraines peuvent également être importantes, notamment dans les milieux caractérisés par des sols à grains grossiers et des couches encaissantes minces, des sols qui sont artificiellement drainés ou lorsque l'écoulement préférentiel se fait par des fractures et macropores. On reconnaît de plus en plus que la santé écologique des cours d'eau peut être contrôlée par des apports continus en phosphore, comme lors de l'émergence d'eau souterraine, qui dominent pendant les périodes où la demande biologique est la plus grande (p. ex. périodes d'étiage pendant l'été).

L'évaluation de la charge en éléments nutritifs de l'eau souterraine qui émerge dans les affluents est extrêmement difficile. L'émergence des eaux souterraines est particulièrement difficile à quantifier en raison de la grande variabilité temporelle et spatiale (section 2). En outre, le déversement d'éléments nutritifs est aussi contrôlé par des sources précises d'éléments nutritifs et par les réactions biogéochimiques complexes et les processus hydrologiques qui se produisent quand les éléments nutritifs sont transportés à partir de leur source vers un plan d'eau de surface récepteur.

La charge en éléments nutritifs provenant des eaux souterraines est souvent fortement régulée par des processus qui se produisent dans les zones de transition (p. ex. zones hyporhéiques) et les zones riveraines. Les zones riveraines retirent souvent les éléments nutritifs des eaux souterraines avant leur émergence dans les eaux de surface. Les réactions qui se produisent dans les zones hyporhéiques (voir la section 2) peuvent modifier considérablement la composition chimique de l'eau souterraine qui émerge ou s'infiltre dans l'eau de surface. Les réactions dans les zones hyporhéiques peuvent changer la forme de composés d'azote dissous et réguler le phosphore en offrant un stockage temporaire. Le fonctionnement de ces zones est extrêmement complexe et fortement influencé par les hétérogénéités spatiales, les temps de séjour dans les voies d'écoulement et les événements tels que l'inondation des rives. Malgré ces complications, l'émergence d'eau souterraine vers les cours d'eau peut être une voie d'entrée importante des éléments nutritifs dans les Grands Lacs.

Bien qu'il soit estimé que l'émergence directe d'eau souterraine n'est qu'un petit composant des bilans hydrologiques des Grands Lacs (section 2), elle peut jouer un rôle disproportionnellement important dans l'acheminement des éléments nutritifs dans les lacs. Plus particulièrement, la charge en éléments nutritifs apportée par l'émergence directe d'eau souterraine peut être importante lorsque les aquifères peu profonds des régions littorales ont des concentrations d'éléments nutritifs élevées.

Besoins scientifiques prioritaires liés aux répercussions des éléments nutritifs dans les eaux souterraines sur la qualité de l'eau des Grands Lacs.

- Déterminer les liens entre l'utilisation des terres, la gestion des terres et la charge en éléments nutritifs de l'eau souterraine.
- Définir le rôle des zones de transition et d'autres zones dans la régulation des flux d'éléments nutritifs des eaux souterraines vers les eaux de surface.
- Passer de la compréhension scientifique locale aux évaluations d'échelle régionale.
- Évaluer la disponibilité des données sur la qualité des eaux souterraines.

5. Eau souterraine et habitats aquatiques dans les Grands Lacs

L'eau souterraine exerce une influence sur le bilan hydrologique et la disponibilité d'habitats propices pour les organismes des Grands Lacs, des milieux humides côtiers et des plans d'eau intérieurs, ainsi que des cours d'eau et des milieux humides dans le bassin des Grands Lacs. L'eau souterraine qui pénètre dans les écosystèmes aquatiques ou qui en sort a une incidence sur leurs caractéristiques hydrologiques, thermiques et chimiques. De ce fait, elle a une incidence sur la quantité et le type d'habitats disponibles pour le biote, ainsi que sur la qualité de ces habitats. La composition chimique des eaux souterraines qui ont une incidence sur les habitats aquatiques peut être influencée par la géologie environnante et l'activité humaine dans le bassin versant (p. ex. contaminants, voir les sections 2, 3 et 4).

Effets des eaux souterraines dans les habitats côtiers, les affluents et les terres humides des Grands Lacs.

Les eaux littorales des Grands Lacs fournissent des habitats variés et essentiels et constituent un lien entre le bassin hydrographique terrestre et les eaux libres. Les zones côtières constituent les foyers des enjeux en matière de quantité d'eau, de qualité de l'eau et de ressources naturelles dans les Grands Lacs, car ces secteurs sont les plus touchés par les facteurs de stress anthropiques. En général, c'est dans les zones côtières que l'émergence directe d'eau souterraine dans les Grands Lacs est la plus élevée, mais ses hétérogénéités spatiales (en raison des différences dans les propriétés hydrauliques des matières géologiques et d'autres facteurs, voir la section 2) ont une incidence sur la quantité, la qualité et les types d'habitats disponibles pour le biote. Les températures des eaux souterraines sont relativement constantes, ce qui fait que l'émergence d'eau souterraine peut atténuer les températures de l'eau de surface et avoir une incidence sur les habitats. Beaucoup d'études démontrent les effets de la température sur le biote ou l'habitat des zones côtières, mais il n'y a pas suffisamment d'études liant les effets sur l'habitat et le biote. On manque aussi d'analyses comparatives des conditions de l'habitat côtier et des milieux vivants dans des conditions d'émergence faible ou élevée d'eau souterraine.

Comparativement aux zones côtières, les apports en eaux souterraines dans les cours d'eau pourraient avoir un effet relativement plus important sur les caractéristiques chimiques et thermiques parce que la majeure partie de l'eau dans certains cours d'eau pourrait provenir directement de l'eau souterraine (section 2). Les cours d'eau qui alimentent les Grands Lacs fournissent un habitat pour les espèces animales et végétales riveraines et fluviales et sont les principaux habitats de frai et d'alevinage pour le tiers des poissons dans les Grands Lacs. Une grande partie de l'eau qui se déverse dans les affluents provient de l'émergence d'eau souterraine (section 2), ce qui expose le biote riverain aux contaminants et aux éléments nutritifs transportés par l'eau souterraine (sections 3 et 4). Les caractéristiques thermiques des cours d'eau sont déterminées par les effets relatifs des eaux souterraines, la morphométrie des cours d'eau, le climat et les caractéristiques du bassin versant. L'ampleur, le moment et la variabilité spatiale de l'émergence peuvent avoir une incidence sur les régimes thermiques, ce qui a un impact sur les structures des milieux vivants des cours d'eau. En hiver, les infiltrations des eaux souterraines fournissent un habitat d'hivernage exempt de glace souterraine; en été, les eaux souterraines rafraîchissent les cours d'eau et fournissent aux espèces des refuges près de leurs limites thermiques supérieures. L'abondance d'invertébrés benthiques dans les cours d'eau, la richesse taxinomique et la respiration périphytonique peuvent également être améliorées par un taux élevé d'écoulement des eaux souterraines.

Les milieux humides côtiers et intérieurs sont parmi les systèmes les plus diversifiés sur le plan écologique et les plus productifs sur le plan biologique dans la région des Grands Lacs, et jouent un rôle important dans l'atténuation des effets de l'activité humaine (p. ex. éléments nutritifs, sédiments) sur les ressources en eau. Quatre-vingt-dix pour cent des milieux humides dans les

zones côtières des Grands Lacs sont des marais; parmi les autres principaux types, mentionnons les marécages, les tourbières oligotrophes et les tourbières minérotrophes. On distingue deux types de milieux humides côtiers dépendant de l'eau souterraine le long des Grands Lacs : les riches tourbières minérotrophes côtières et les riches marécages de conifères. L'interaction des eaux souterraines avec ces milieux humides dépend en partie de la géologie. Les eaux souterraines fournissent un apport stable en eau et en éléments nutritifs, et peuvent également apporter des contaminants. Les liens entre les composantes du bilan hydrologique et les milieux humides ne sont pas bien connus, principalement en raison d'une mauvaise compréhension de la façon dont les eaux souterraines entrent et sortent des milieux humides. Peu d'études sont disponibles concernant les effets des eaux souterraines sur les conditions thermiques des habitats de ces tourbières minérotrophes et de ces marécages.

Besoins scientifiques prioritaires liés au rôle des eaux souterraines dans les habitats des Grands Lacs.

- Cartographier la recharge des nappes et l'émergence de l'eau souterraine, car ces renseignements sont essentiels pour comprendre ses effets sur l'habitat.
- Intégrer des modèles d'eau souterraine à d'autres modèles d'écosystème, comme les modèles portant sur l'hydrodynamique des eaux littorales ainsi que les modèles hydrologiques et thermiques des affluents et des milieux humides, afin de déterminer les liens écologiques entre les espèces, les populations ou les milieux vivants et l'émergence des eaux souterraines.
- Évaluer l'importance de l'émergence d'eau souterraine dans la répartition des espèces et les caractéristiques des écosystèmes.
- Évaluer l'importance de l'effet des tendances spatiales de l'émergence d'eau souterraine sur les caractéristiques des écosystèmes.
- Répertorier les écosystèmes qui sont vulnérables aux changements sur le plan de l'émergence de l'eau souterraine.

6. Effets du développement urbain et de l'infrastructure sur les eaux souterraines

Le bassin des Grands Lacs accueille quelques-unes des villes les plus peuplées de l'Amérique du Nord et l'urbanisation est à la hausse. Les eaux souterraines peuvent être une source importante d'approvisionnement pour les banlieues en pleine expansion et les villes rurales plus petites; toutefois, la plupart des grandes villes dans le bassin tirent la plus grande partie de leur eau des Grands Lacs, ce qui signifie que les eaux souterraines urbaines retiennent peu l'attention jusqu'à ce que des problèmes surviennent. Les problèmes incluent, entre autres, des répercussions sur la qualité de l'eau des plans d'eau récepteurs et des écosystèmes aquatiques sensibles, et une élévation du niveau des eaux souterraines.

Problèmes de quantité et de qualité.

Bien que l'urbanisation puisse réduire la recharge directe des nappes phréatiques, elle modifie aussi radicalement tout le cycle de l'eau, introduisant de nouvelles sources d'alimentation qui peuvent plus que compenser les pertes d'alimentation directe. Ces sources comprennent l'infiltration provenant des installations septiques, les fuites d'égouts et de conduites d'eau principales, l'irrigation excessive dans les villes et les eaux de ruissellement, que ce soit de façon naturelle en tant qu'alimentation indirecte ou de façon intentionnelle en conséquence des plans de gestion des eaux pluviales. Avec le temps, l'alimentation excessive peut entraîner la montée du niveau des eaux souterraines et un lessivage vers le haut des sels et des contaminants déjà accumulés dans la zone non saturée peu profonde. Cette montée du niveau des eaux souterraines peut causer l'inondation des rues, des caves, des égouts, des fosses septiques, des conduites de services publics et des tunnels de transport, réduire la capacité portante des ouvrages et avoir une incidence sur les aires d'agrément en saturant d'eau les terrains de sport et en tuant les arbres. Le « karst

urbain » (p. ex. les fissures dans le revêtement imperméable, les zones perméables associées à des matériaux de remblayage, la présence de réseaux de tuyauterie souterraine) et l'infrastructure verte ont une grande incidence sur la recharge des nappes phréatiques et l'écoulement des eaux souterraines peu profondes en milieu urbain. L'assèchement pour la construction peut avoir une incidence sur les plans d'eau de surface adjacents, comme les rivières et les lacs, et peut avoir des effets importants sur la température, la limpidité, les éléments nutritifs et la chimie des ions des eaux littorales, ce qui a une incidence sur la qualité de l'habitat.

Dans les villes partout dans le bassin des Grands Lacs, les eaux souterraines urbaines sont souvent contaminées par toute la gamme de polluants provenant des villes, comme les éléments nutritifs (en particulier le nitrate), le sel, les hydrocarbures pétroliers et un vaste éventail de substances chimiques synthétiques (sections 3 et 4). Dans de nombreuses zones urbaines, un grand nombre de sources fusionnent efficacement afin de créer une source de distribution. La majeure partie de cette eau souterraine contaminée pénétrera dans les Grands Lacs, directement par émergence dans les zones riveraines, ou indirectement par les drains, les cours d'eau et les tunnels. De nombreux contaminants dans les eaux souterraines en milieu urbain sont le résultat de pratiques passées (p. ex. les terrains abandonnés dans les ports industrialisés). Les sels de voirie, les égouts qui fuient et les sites d'enfouissement fermés non équipés de membrane d'étanchéité constituent certaines des menaces pour les eaux souterraines en milieu urbain. Environ la moitié du sel épandu sur les routes dans les zones urbaines pénètre dans le sous-sol, ce qui cause, à long terme, une augmentation graduelle de la salinité des eaux souterraines et des cours d'eau récepteurs. Les concentrations de chlorure dans le débit de base des cours d'eau urbains dans le bassin des Grands Lacs sont déjà considérées comme étant chroniquement toxiques pour de nombreuses espèces d'eau douce. La croissance urbaine et le développement industriel dans tout le bassin ont eu lieu près des lacs et des cours d'eau, ce qui fait que le temps de séjour pour les eaux souterraines polluées a souvent tendance à être court (p. ex. moins d'un an). Cette situation menace considérablement les frayères et les écosystèmes sensibles semblables dépendants des eaux souterraines.

Exemples de problèmes dans les grandes zones urbaines du bassin des Grands Lacs.

Du milieu à la fin des années 1900, l'expansion vers l'ouest des banlieues de Chicago a fait augmenter la demande en eau souterraine, ce qui a entraîné une baisse des niveaux d'eau régionaux dans les aquifères peu profonds. Le forage de puits profonds soulève l'inquiétude que les eaux salines profondes et le radium soient entraînés dans les aquifères peu profonds, lesquels présentent déjà des signes de dégradation par les polluants urbains. La poursuite de l'étalement urbain dans la région du Grand Toronto a entraîné une contamination grave des eaux souterraines sous la forme de sources urbaines polluées.

Besoins scientifiques prioritaires liés aux répercussions de l'urbanisation sur les eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs.

- Surveillance accrue des eaux souterraines, collecte de données sur l'utilisation de l'eau, élaboration de modèles de gestion de l'eau en milieu urbain et évaluation des risques.
- Regroupement de renseignements sur l'infrastructure souterraine et recherche sur les « karsts urbains ».
- Recherche pour mieux comprendre la situation afin de mieux gérer les eaux pluviales et d'atténuer les répercussions de l'assèchement.

7. Répercussions des changements climatiques sur les eaux souterraines

Les répercussions des changements climatiques sur la qualité et la quantité des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs sont mal comprises. Les changements climatiques peuvent modifier les propriétés physiques et chimiques des eaux du bassin des Grands Lacs, ainsi que les fonctions écologiques de ces eaux. Les hausses constatées dans les températures saisonnières et les changements prévus dans la hauteur et la distribution des précipitations pourraient conduire à des changements fondamentaux dans le cycle hydrologique et dans la manière dont l'eau est gérée. Les changements incluront probablement le moment ainsi que le volume d'eau alimentant le système d'eau souterraine. La qualité et la quantité de l'eau souterraine disponible pour l'eau potable et les écosystèmes, par exemple pour les poissons d'eau froide dans les ruisseaux, seront également touchées.

Les observations instrumentales indiquent que les températures de la surface de la terre et de la mer ont augmenté au cours des 100 dernières années, et que les températures moyennes mondiales devraient augmenter de 2 à 4,7 °C d'ici la fin du siècle, avec des changements encore plus importants prévus sur les masses terrestres. Cela influera sur les ressources en eau par l'intermédiaire de changements dans les précipitations, la vitesse du vent, l'humidité relative et l'évapotranspiration qui en résulte. Les augmentations prévues des températures pendant la saison froide dans l'ensemble du bassin des Grands Lacs devraient réduire la durée de la saison de gel, ce qui aura une incidence sur le ruissellement et l'infiltration; toutefois, les températures du sol pendant l'hiver sont à la baisse, peut-être en raison d'un enneigement moins important et moins isolant, ce qui illustre les réactions complexes des systèmes naturels au lent réchauffement atmosphérique. Peu d'études réalisées dans le bassin des Grands Lacs ont estimé la variation de la recharge des nappes phréatiques dans l'espace et dans le temps. Ces estimations sont sensibles à la température du sol, à l'accumulation de la neige et à la fonte des neiges. Les eaux souterraines ont une relation plus complexe que les eaux de surface avec le climat. Une étude de modélisation de la rivière Muskegon, dans le Michigan, indiquait que l'augmentation de la température de l'air faisait augmenter l'évapotranspiration, mais que l'augmentation des précipitations pendant les mois d'hiver entraînait des augmentations de la recharge des nappes et de l'écoulement fluvial.

Des facteurs non liés au climat continueront d'avoir une incidence sur l'offre et la demande en eau dans un contexte de changement climatique. Peu d'études ont été réalisées quant aux effets cumulatifs des changements climatiques et de l'activité humaine sur les ressources en eau souterraine qui sont disponibles. La modélisation des effets de l'activité humaine et de l'utilisation des terres sur les climats régionaux du bassin des Grands Lacs offre différentes réponses, comme des augmentations ou des diminutions locales à la fois de l'évapotranspiration et du ruissellement.

Climat, eau souterraine et prévisions : évaluation des répercussions.

L'hypothèse selon laquelle le cycle de l'eau varie selon une fourchette connue basée sur des observations passées de la température, des précipitations et de l'écoulement fluvial n'est plus valide en raison des changements climatiques. Pour une gestion efficace, les changements potentiels dans le cycle hydrologique peuvent être étudiés à l'aide des prévisions tirées des modèles de circulation générale. Toutefois, ces prévisions sont fondées sur une taille de grille d'environ 200 km, une résolution trop grossière pour l'échelle régionale à laquelle la gestion des ressources en eau se produit, y compris dans le bassin des Grands Lacs. Pour fournir les renseignements nécessaires à une échelle régionale, deux techniques de réduction d'échelle ont été mises au point : la réduction d'échelle statistique et les modèles climatiques régionaux (MCR); toutefois, l'incertitude liée aux modèles de circulation générale est généralement plus grande que l'incertitude liée à la réduction d'échelle, et toutes deux sont invariablement supérieures à l'incertitude liée à la modélisation hydrologique ou à la variabilité naturelle.

L'approche d'ensemble, qui utilise les projections des modèles de circulation générale et des modèles climatiques régionaux, est utilisée pour aborder cette incertitude; toutefois, l'insatisfaction

à l'égard de l'incertitude qui demeure quant à cette approche descendante pour une modélisation de la réduction d'échelle a mené à l'élaboration d'une solution de rechange : la graduation des décisions, une approche ascendante. Les vulnérabilités potentielles sont définies par les intervenants et les experts comme des seuils (zones de tolérance) pour les paramètres d'intérêt spécifiques tels que le niveau d'eau souterraine ou le niveau des lacs. Un domaine de climat est ensuite construit qui contient les états climatiques nécessaires pour faire en sorte que le paramètre d'intérêt dépasse les seuils, à l'aide de multiples simulations climatiques et de projections précises ou adaptées fondées sur des extrêmes climatiques passés. La « vraisemblance » de l'état climatique est ensuite évaluée, tel qu'il est démontré dans l'étude internationale des Grands Lacs d'amont.

Effets sur la qualité et la quantité des eaux souterraines.

Peu d'études ont examiné l'impact des changements climatiques sur la qualité de l'eau souterraine dans le bassin des Grands Lacs. Il continue d'y avoir de l'incertitude quant à l'ampleur et même la direction des changements dans la recharge ou le niveau des nappes dans le bassin des Grands Lacs, ce qui prouve que nous sommes actuellement incapables de prévoir de façon quantitative et avec certitude l'ampleur ou la direction de l'impact des changements climatiques sur les ressources d'eau souterraine.

Besoins scientifiques prioritaires liés aux répercussions des changements climatiques sur les eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs.

- Élaboration de méthodes aux fins d'analyse des incertitudes pour chaque étape de la démarche axée sur la réduction d'échelle et la modélisation.
- Mise au point de méthodes d'identification et d'évaluation de la fréquence et de l'intensité changeantes des événements extrêmes.
- Création et application de modèles intégrés pour le climat, l'eau de surface et l'eau souterraine.
- Établissement et application de scénarios d'utilisation future des terres et des eaux aux fins de modélisation des effets sur les eaux souterraines.
- Surveillance hydrologique intégrée, y compris des eaux souterraines.

8. Conclusions et résumé des principaux besoins scientifiques

L'une des principales questions posées dans le présent rapport se résume comme suit : Les eaux souterraines améliorent-elles la qualité de l'eau des Grands Lacs ou entraînent-elles au contraire des effets défavorables? Comme le mentionnent les sections précédentes, les eaux souterraines qui s'écoulent dans les affluents du bassin des Grands Lacs ou directement dans ce dernier peuvent soit améliorer, soit détériorer la qualité de l'eau. Dans certaines régions, ces eaux souterraines peuvent simultanément produire des effets positifs et négatifs. Par conséquent, le présent rapport donne un éventail de réponses à la question ci-dessus. Ces réponses peuvent être résumées dans les cinq points suivants :

1. Les eaux souterraines améliorent la qualité de l'eau des Grands Lacs.

Grands Lacs, qu'elle se produise directement ou par le biais d'autres cours d'eau, contribue de façon importante au réapprovisionnement en eau des Grands Lacs. L'émergence des eaux souterraines dans les Grands Lacs ou dans leurs affluents, notamment à partir de zones vierges, contribue à maintenir la qualité de l'eau dans ces lacs. Ces eaux souterraines jouent un rôle essentiel dans le maintien de la quantité et de la qualité de l'eau ainsi que de la température des habitats, dont certains (cours d'eau pérennes, tourbières minérotrophes côtières) constituent des écosystèmes tributaires des eaux souterraines.

2. Les eaux souterraines contaminées influent sur la qualité de l'eau des Grands Lacs.

Dans les zones aménagées du bassin des Grands Lacs, lorsque les eaux souterraines sont contaminées par des activités comme le développement urbain, l'exploitation minière ou l'agriculture,

elles peuvent avoir une incidence négative sur la qualité de l'eau des Grands Lacs et de leurs affluents, ainsi que sur leurs habitats aquatiques respectifs. La contamination des eaux souterraines résulte d'activités passées, qui se sont parfois déroulées il y a plusieurs décennies, particulièrement dans les zones urbaines ou industrielles établies depuis longtemps. Dans les régions où l'utilisation des terres a changé, il y a peu de traces de ces problèmes à la surface. L'émergence d'eau souterraine est probablement un vecteur (une voie) important pour certains contaminants ayant une incidence sur les Grands Lacs. Les produits chimiques transportés vers les Grands Lacs par les eaux souterraines sont souvent persistants et mobiles.

3. Les eaux souterraines constituent une zone de traitement ou de stockage contribuant à la protection de la qualité de l'eau des Grands Lacs.

Les processus se produisant sous terre peuvent atténuer, immobiliser ou éliminer naturellement de nombreux contaminants. Ces processus sont souvent intensifiés dans des « zones de transition » où il y a un échange entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Toutefois, il existe encore plusieurs lacunes sur le plan des connaissances scientifiques quant au devenir des contaminants dans les eaux souterraines. Par exemple, les essais en laboratoire sur lesquels s'appuie notre compréhension actuelle du devenir des contaminants ne portent pas, souvent, directement sur les conditions des eaux souterraines. Même quand les contaminants ne sont pas dégradés ou éliminés dans le sous-sol, les eaux souterraines peuvent agir comme une zone de stockage temporaire ou à long terme (p. ex. chlorure pris au piège dans des dépôts riches en argile), offrant ainsi une certaine protection pour la qualité de l'eau des cours d'eau dans le bassin des Grands Lacs et dans les Grands Lacs.

4. À long terme, l'eau souterraine constitue une source de contaminants ayant une incidence négative sur la qualité de l'eau des Grands Lacs.

Lorsque des contaminants ne sont pas dégradés ou retirés, la zone d'eau souterraine peut servir de réservoir souterrain qui devient une source de contaminants à long terme, ce qui pourrait entraîner des niveaux problématiques et stables de contaminants dans les eaux souterraines qui émergent dans les cours d'eau ou les zones côtières des lacs, bien après que les sources de ces contaminants aient été éliminées ou réduites.

5. Nous ne comprenons pas encore totalement l'impact des eaux souterraines sur les Grands Lacs.

Il est nécessaire d'adopter de nouvelles approches permettant un suivi élargi et une meilleure prise en considération de la circulation des contaminants dans le bassin des Grands Lacs, y compris les flux d'eaux souterraines vers les eaux de surface, et l'inverse (p. ex. le stockage dans les berges). La section suivante décrit les améliorations nécessaires, sur le plan scientifique, en vue de procéder à une analyse et à un suivi plus approfondis de l'impact des eaux souterraines sur la qualité de l'eau des Grands Lacs dans huit domaines différents. Toutes ces activités scientifiques sont liées entre elles. Par exemple, une interprétation (modèles, information) peut souvent nous amener à réfléchir sur nos besoins en matière de surveillance, ce qui peut entraîner la conception et la mise en œuvre de nouveaux outils de mesure sur le terrain.

Principaux secteurs où il y a des besoins scientifiques.

Les lacunes en matière de connaissances et les besoins scientifiques déterminés dans le présent rapport peuvent être résumés dans les principaux domaines suivants, en ce qui a trait aux activités scientifiques qui pourraient être entreprises pour aborder le mandat de l'annexe 8 de l'AQEG :

- **Besoin scientifique principal no 1 : Évaluation approfondie de l'émergence de l'eau souterraine (quantité) à l'échelle régionale vers l'eau de surface dans le bassin des Grands Lacs.** Une meilleure compréhension de l'impact des eaux souterraines sur la qualité de l'eau des Grands Lacs exigera un relevé plus précis de l'écoulement des eaux souterraines vers les Grands Lacs et leurs affluents, à l'échelle locale et à l'échelle du bassin.

- **Besoin scientifique principal no 2 : Établissement de priorités scientifiques visant à améliorer l'évaluation de la distribution géographique des sources connues et potentielles de contaminants dans les eaux souterraines, en lien avec la qualité de l'eau des Grands Lacs, et l'efficacité des mesures d'atténuation.** Pour comprendre les effets de l'eau souterraine sur l'amélioration ou la détérioration de la qualité de l'eau dans les Grands Lacs, il sera nécessaire de compiler et d'évaluer les sources connues ou soupçonnées de contamination des eaux souterraines, considérées comme ayant des effets directs ou potentiels sur la qualité des eaux littorales des Grands Lacs et de leurs affluents. On pourra cibler les grands sites industriels (anciens et actuels), les aménagements urbains et les zones régionales d'utilisation généralisée de produits chimiques tels que les sels, les engrais et les pesticides. Cette évaluation pourrait également inclure l'évaluation de l'efficacité des mesures d'atténuation, y compris les changements apportés à la réglementation et aux pratiques et mesures de prévention, d'assainissement et de confinement, et l'introduction de pratiques de gestion bénéfiques, dans les cas de contamination des eaux souterraines à ces endroits.
- **Besoin scientifique principal no 3 : Suivi et surveillance continue de la qualité des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs.** Une compréhension des effets positifs et négatifs de l'eau souterraine sur la qualité de l'eau des Grands Lacs exigera également une compilation et une analyse des données disponibles sur la qualité des eaux souterraines dans le bassin. Les réseaux de surveillance actuels semblent montrer des lacunes importantes quant à l'information relative aux sources ponctuelles et diffuses de contamination. Ces réseaux pourront peut-être s'enrichir de programmes améliorés pour le suivi et la surveillance locale (propre au site) de l'eau souterraine dans les zones urbaines et industrielles. Il faudra envisager certaines approches non conventionnelles, telles que l'échantillonnage des eaux souterraines peu profondes par l'installation temporaire de pointes filtrantes dans les zones riveraines et le long des rivages urbains, comme l'ont révélé quelques études récentes. Les activités de suivi et de surveillance doivent être élargies sur le plan de la gamme de contaminants analysés, afin d'inclure les produits chimiques faisant l'objet de préoccupations plus récentes. Il sera possible d'intégrer cette information ou d'y accéder à partir de puits de surveillance existants, qu'ils soient privés ou administrés par des organisations non gouvernementales, plutôt que de mettre en place de nouvelles installations coûteuses. Ces renseignements peuvent être directement liés aux secteurs préoccupants dans les Grands Lacs (annexe 1 de l'AQEGL) et à l'aménagement panlacustre (annexe 2 de l'AQEGL).
- **Besoin scientifique principal no 4 : Recherche approfondie sur l'analyse locale de l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface.** Il nous faudra une compréhension plus détaillée des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface afin d'évaluer adéquatement l'impact des eaux souterraines sur la qualité de l'eau et les habitats aquatiques des Grands Lacs. Cet effort inclurait la tenue d'études locales sur le terrain, afin d'évaluer le passage des contaminants entre les eaux souterraines et les eaux de surface et les divers processus pouvant atténuer les effets de ces contaminants, en plus de déterminer la quantité d'eau souterraine qui émerge. Cette nouvelle recherche sur le terrain pourrait cibler les zones riveraines des cours d'eau et les régions côtières des Grands Lacs, notamment les milieux humides côtiers, les plages, et les côtes urbaines aménagées, afin d'évaluer directement l'interaction entre l'eau souterraine et l'eau de surface et l'effet de ces échanges sur les habitats aquatiques. Ces études locales auraient pour objectif d'élaborer de meilleurs modèles conceptuels et numériques de l'interaction entre l'eau souterraine et l'eau de surface dans des conditions hydrogéologiques différentes et des contextes variés d'utilisation des terres dans le bassin des Grands Lacs, des aspects de ces interactions liés à la qualité de l'eau et des effets sur les habitats aquatiques. Certaines des études à l'échelle locale pourraient directement combler les lacunes en matière de renseignements et dissiper les incertitudes associées à l'utilisation des terres et

à l'infrastructure, en particulier dans les zones urbaines, mais également dans les zones rurales (p. ex. drainage par tuyaux enterrés), et pourrait également évaluer la façon dont les variations spatiales et temporelles dans la composition chimique de l'eau dans les tronçons des cours sont liées à l'émergence des eaux souterraines.

- **Besoin scientifique principal no 5 : Élaboration d'outils plus efficaces pour la surveillance, le suivi et l'évaluation des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface à l'échelle locale.** Il serait nécessaire d'élaborer de meilleurs outils et protocoles afin de réaliser des études peu coûteuses et relativement peu intrusives sur l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface à l'échelle locale (par tronçons), afin de permettre la surveillance, le suivi et les recherches mentionnées ci-dessus (besoins scientifiques principaux 2 et 3).
- **Besoin scientifique principal no 6 : Recherche approfondie sur le rôle des eaux souterraines dans les habitats aquatiques.** Des études approfondies propres aux sites sont requises pour évaluer les effets (et les relations de dépendance) de l'eau souterraine sur les communautés aquatiques, plus précisément les communautés benthiques et celles qui dépendent de l'eau souterraine dans les cours d'eau et les milieux humides côtiers. Des enquêtes sur la manière dont les différentes communautés microbiennes et écologiques répondent à des constituants chimiques des eaux souterraines peu profondes, y compris les contaminants, fourniraient des renseignements importants sur le rôle des eaux souterraines dans les habitats aquatiques.
- **Besoin scientifique principal no 7 : Amélioration de la compréhension des effets du développement urbain sur les eaux souterraines.** Il manque des données quantitatives sur la complexité du cycle de l'eau dans les zones urbaines du bassin des Grands Lacs, sur le rôle des eaux souterraines dans ce cycle ainsi que sur la façon dont les eaux souterraines en milieu urbain sont touchées par l'infrastructure urbaine et l'extraction. Il manque aussi des renseignements quantitatifs sur les flux de contaminants provenant de l'émergence d'eau souterraine dans les cours d'eau et les lacs dans les zones urbaines. Le fait de combler ces lacunes scientifiques en mettant en œuvre de nouvelles activités de surveillance et de recherche améliorerait grandement la compréhension des effets des eaux souterraines en milieu urbain sur les plans d'eau récepteurs et sur les écosystèmes aquatiques. Des outils de modélisation globale des eaux souterraines sont nécessaires pour guider la gestion des eaux souterraines en milieu urbain et l'évaluation des risques.
- **Besoin scientifique principal no 7 : Élaboration de modèles à plus grande échelle représentant les effets régionaux de l'eau souterraine sur la qualité de l'eau des Grands Lacs.** Un autre lien essentiel favorisant une approche scientifique intégrée et améliorée consisterait à élaborer et à tenir à jour, à l'échelle régionale, des modèles numériques qui intégreraient les évaluations de l'émergence de l'eau souterraine sur le plan régional, les données de surveillance et de suivi et les activités de recherche locales. Le défi consisterait à élargir notre compréhension approfondie des processus locaux (fondée sur les études locales) pour la porter à l'échelle régionale afin d'évaluer la moyenne temporelle de l'écoulement d'eau souterraine (quantité et contaminants) vers les Grands Lacs, que ce soit directement ou indirectement par leurs affluents. Ce type de modélisation fournira une évaluation très utile des effets des eaux souterraines sur la qualité de l'eau des Grands Lacs et sur les habitats aquatiques à l'échelle régionale.

Remerciements

Les éditeurs soulignent l'excellent travail des nombreux spécialistes des eaux souterraines, des écologues, des hydrologues, des ingénieurs et des autres qui ont partagé leurs connaissances pour ce rapport. Les auteurs sont cités au début de chaque chapitre. Les chapitres 2, 3, 4, 5 et 7 incorporent une grande partie de l'information compilée dans des rapports précédents préparés pour Environnement Canada (EC), ces rapports sont, respectivement : Coulibaly et Kornelsen (2013) et Conant (2014); Conant (2014); Robinson (2014); Portt (2014) et Sykes (2014). Les conseillers des divers chapitres comprenaient : Craig Smith, Ohio Environmental Protection Agency (chapitre 3); Linda Nicks, Upper Thames River Conservation Authority, (chapitre 3); Nicholas E. Jones, ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario (chapitre 5); Susan E. Doka, Pêches et Océans Canada (chapitre 5). Lan Ly a aidé à compiler et à formater les références de ce rapport. Le glossaire a été préparé par Lisa Sealock d'Environnement Canada, avec des commentaires de Janet Carter du Service géologique des États-Unis (USGS) et une contribution de divers auteurs des chapitres du présent rapport.

Parmi les lecteurs des divers chapitres du rapport figuraient des représentants des organisations membres du Comité exécutif des Grands Lacs et des membres des sous-comités propres à une annexe qui relèvent du Comité exécutif des Grands Lacs (notamment les annexes 4 et 9), entre autres. Ces derniers incluaient, sans s'y limiter : des représentants d'Environnement Canada, le Michigan Department of Environmental Quality et l'Agence des États-Unis pour la protection de l'environnement (USEPA) (divers chapitres); Janet Carter (USGS) [chapitres 1, 2, 6, 8]; l'Administration de conservation de l'Ontario (chapitre 2); Agriculture et Agroalimentaire Canada, le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (chapitre 2, 4); la National Oceanic and Atmospheric Administration, le ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario, le United States Army Corps of Engineers (chapitre 7).