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



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

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

December, 2024

Version Finale

Éditeurs du rapport

Mohamed Mohamed¹, Howard Reeves², James W. Roy¹

¹Environnement et Changement Climatique Canada, ²United States Geological Survey

Remerciements

Les représentants des organisations membres du sous-comité de l'annexe 8 et diverses organisations externes et universités (énumérées ci-dessous) ont apporté leur contribution à la planification initiale des chapitres du rapport et ont formulé des commentaires constructifs sur les versions préliminaires de ces chapitres. Cette aide a été grandement appréciée. Ashij Kumar (Environnement et Changement Climatique Canada; ECCC) et d'autres membres du personnel du secrétariat du Comité exécutif des Grands Lacs ont fourni de précieux conseils et facilité la traduction de ce rapport.

Des remerciements tout particuliers vont à: Brian Austin, Bill Phelps, Beth Finzer, Matt Silver, Wisconsin Department of Natural Resources; Samuel Blazey, Indiana Department of Environmental Management; Andrea Brookfield, University of Waterloo; Patricia Chow-Fraser, McMaster University; Serban Danielescu, James Roy, ECCC; Scott Cousins, City of Guelph (Ontario); Laura Erban, US Environmental Protection Agency; Rick Gerber, Oak Ridges Moraine Groundwater Program; Tim Fletcher, Mark Harris, Luciana Rodrigues, Ministry of the Environment, Conservation and Parks; Don Ford, Toronto and Region Conservation Authority; Walton Kelly, Illinois State Water Survey; Deon Knights, West Virginia University; Jana Levison, University of Guelph; Hayden Lockmiller, United States Geological Survey (USGS) Upper Midwest Water Science Center (WSC); Linda Nicks, Upper Thames River Conservation Authority; Jeff Patzke, Ohio Environmental Protection Agency; Steve Robertson, Minnesota Department of Health; Clare Robinson, Western University; William Shuster, Wayne State University; Barry G. Warner, University of Waterloo; Doug Wilcox, SUNY Brockport; John Wilson, USGS Ohio-Kentucky-Indiana WSC; Christine Rivard, Ressources naturelles Canada

Citations suggérées

Pour le rapport:

Mohamed M., Reeves H., Roy J.W. (Eds.) 2024. Science des eaux souterraines applicable à l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs: rapport sur la situation actualisé. Établi par le sous-comité de l'annexe 8 du Comité exécutif des Grands Lacs. Document publié en ligne par Environnement et Changement climatique Canada et la U.S. Environmental Protection Agency.

Pour les chapitres (p. ex. pour le chapitre 2)

Reeves H., Danielescu S., Priebe E., Zhang H. 2024. Interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Chapitre 2 dans Mohamed M., Reeves H., Roy J.W. (Eds.) 2024. Science des eaux souterraines applicable à l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs: rapport sur la situation actualisé. Préparé par le sous-comité de l'annexe 8 du Comité exécutif des Grands Lacs. Publié en ligne par Environnement et Changement climatique Canada et la U.S. Environmental Protection Agency.

Photo de couverture: Eaux souterraines circulant dans une grotte karstique; zone de conservation du karst d'Eramosa, Hamilton, Ontario, Canada.

Crédit photo: James Roy, Environnement et Changement climatique Canada

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
1.1	Contexte	2
1.2	But du rapport	2
1.3	Aperçu des chapitres	4
2	Interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface.....	10
2.1	Introduction	10
2.2	Besoins scientifiques prioritaires selon le rapport de 2016	12
2.3	Mise à jour et examen des besoins scientifiques prioritaires et des lacunes dans les connaissances	16
2.4	Résumé et besoins scientifiques prioritaires	22
3	L'INFLUENCE DES CONTAMINANTS DES EAUX SOUTERRAINES SUR LE BASSIN DES GRANDS LACS	27
3.1	Introduction	27
3.2	Préoccupations nouvelles ou croissantes concernant les contaminants:.....	31
3.3	Recherches spécifiques au bassin des Grands Lacs.....	35
3.4	Progrès scientifiques concernant les besoins scientifiques de 2016	37
3.5	Mise à jour des besoins scientifiques prioritaires.....	41
4	EAUX SOUTERRAINES ET ÉLÉMENTS NUTRITIFS	50
4.1	Introduction	50
4.2	Besoins scientifiques prioritaires identifiés dans le rapport de 2016	51
4.3	Mise à jour de l'état des besoins scientifiques prioritaires	52
4.4	Besoins scientifiques émergents	59
5	EAU SOUTERRAINE ET HABITATS DANS LES GRANDS LACS	69
5.1	Introduction	69
5.2	Besoins scientifiques prioritaires identifiés dans le rapport de 2016	71
5.3	Mise à jour des besoins scientifiques prioritaires.....	72

5.4	Mise à jour du tableau sur les besoins scientifiques prioritaires.....	76
6	PRÉOCCUPATIONS RELATIVES AUX EAUX SOUTERRAINES URBAINES LIÉES À LA QUALITÉ DE L'EAU DES GRANDS LACS	83
6.1	Introduction	83
6.2	Mise à jour de l'état des besoins scientifiques prioritaires	88
6.3	Besoins scientifiques prioritaires antérieurs	102
6.4	Besoins et possibilités scientifiques critiques/émergents.....	117
6.5	Mise à jour du tableau des besoins scientifiques prioritaires	121
7	EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES EAUX SOUTERRAINES	141
7.1	Introduction	141
7.2	Résumé (principales constatations).....	142
7.3	Revue de la littérature.....	145
7.4	Méthodes, technologies et incertitudes	158
7.5	Besoins scientifiques.....	161
8	CONCLUSIONS	168
8.1	Introduction	168
8.2	Mises à jour et progrès concernant les lacunes et besoins en matière de données scientifiques mentionnés dans le rapport de 2016.....	169
8.3	Nouveaux enjeux	174
8.4	Principales lacunes, besoins scientifiques et contraintes – mise à jour	175

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Besoins scientifiques prioritaires concernant les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface, tableau tiré du rapport de 2016 (Grannemann et van Stempvoort, 2016).	13
Tableau 2.2 Principaux besoins de recherche concernant les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface selon le rapport de 2016 (Grannemann et van Stempvoort, 2016).	15
Tableau 3.1 Besoins scientifiques prioritaires liés aux eaux souterraines et aux contaminants listés dans le tableau 3.7 du chapitre 3 (Conant et al., 2016a) du rapport de 2016 (Grannemann et Van Stempvoort, 2016).	29
Tableau 3.2 Mesures prises par les États, les provinces et le gouvernement fédéral pour identifier et documenter la contamination des eaux souterraines par les SPFA et leurs sources.	35
Tableau 3.3 Études publiées dans la littérature scientifique revue par des pairs portant sur les observations de terrain de l'émergence d'eaux souterraines contaminées vers les eaux de surface dans le bassin des Grands Lacs.....	37
Tableau 4.1 Besoins scientifiques prioritaires liés aux eaux souterraines et aux éléments nutritifs	51
Tableau 4.2 Mise à jour des besoins scientifiques prioritaires liés aux eaux souterraines et aux éléments nutritifs.....	60
Tableau 5.1 Besoins scientifiques prioritaires liés aux habitats aquatiques. (Chu et al., 2016).	71
Tableau 5.2 Mise à jour des besoins scientifiques prioritaires liés aux habitats aquatiques.	77
Tableau 6.1 Besoins scientifiques prioritaires identifiés dans le rapport de 2016 (Warner et al., 2016)	83
Tableau 6.2 Exemples de facteurs de stress liés aux eaux souterraines qui ont tendance à être amplifiés dans les zones urbaines*.	87
Tableau 6.3 Études du cycle hydrologique urbain à l'extérieur du bassin des Grands Lacs.	91
Tableau 6.4 Synthèse des études récentes sur l'infiltration des eaux souterraines dans les égouts urbains.	92
Tableau 6.5 Études sur l'exfiltration des égouts sanitaires vers les eaux souterraines.	95

Tableau 6.6 Études sur les infrastructures vertes à l'extérieur du bassin des Grands Lacs.	98
Tableau 6.7 Exemples de villes où les efforts de recherche pour comprendre les eaux souterraines urbaines se sont récemment développés.....	103
Tableau 6.8 Synthèse des articles sur la modélisation des risques et de la vulnérabilité des eaux souterraines urbaines.	110
Tableau 6.9 Études menées dans le BGL et dans la région environnante portant sur les chlorures en tant que polluant ou traceur.	114
Tableau 6.10 Exemples d'études récentes sur les contaminants dans les eaux souterraines urbaines.	116
Tableau 6.11 Exemples de sources de données ouvertes.	120
Tableau 6.12 Mise à jour des besoins scientifiques prioritaires, en référence à la liste de 2016 (tableau 6.1 - le nouveau texte est indiqué en gras).	122
Tableau 7.1 Synthèse des modèles utilisés dans les études examinées et situées dans le BGL.....	158
Tableau 7.2 Synthèse des modèles et des approches de forçage climatique utilisés dans les études examinées dans le BGL.	160
Tableau 7.3 Synthèse des besoins scientifiques mis en évidence dans les études examinées dans le BGL.	161

Liste des figures

Figure 2.1 Schéma récapitulatif du cadre d'évaluation et de caractérisation des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface et des impacts potentiels sur les cours d'eau et les lacs, tiré de Conant et coll. (2019).....	12
Figure 6.1 Cycle hydrologique urbain (tirée de Bhaskar et al., 2016).	85
Figure 6.2 Illustration des modifications du bilan hydrologique liées à l'urbanisation (tirée de Sokac, 2019).	86
Figure 6.3 Zones développées dans le bassin des Grands Lacs (en grande partie urbaines). Il est à noter que de nombreux secteurs préoccupants (SP) se trouvent dans les zones développées.....	87

1 INTRODUCTION

Elis Damasceno Silva¹, Mohamed Mohamed¹, Howard W. Reeves²

¹ *Environnement et Changement climatique Canada, Burlington, Ontario, Canada*

² *United States Geological Survey, Lansing, Michigan, États-Unis*

Le bassin des Grands Lacs et l'importance des eaux souterraines

Les eaux souterraines et les eaux de surface font partie d'un cycle hydrologique interrelié, car les eaux souterraines peuvent faire résurgence dans les eaux de surface et les eaux de surface peuvent s'infiltrer dans les systèmes aquifères. Ces échanges entre les eaux souterraines et de surface peuvent se produire à de nombreux endroits, de la tête du bassin versant au lac, et évoluer au fil du temps. Dans le cadre de ce continuum, les eaux souterraines contribuent de manière considérable à la qualité et à la quantité de l'eau des Grands Lacs, principalement en contribuant aux débits de base des cours d'eau. Bien que l'ampleur de cette contribution n'ait pas encore été quantifiée dans l'ensemble du bassin des Grands Lacs, une étude menée par la Commission mixte internationale (CMI) (2010) a permis d'estimer que les eaux souterraines contribuent jusqu'à 79 % de l'écoulement des affluents du lac Michigan vers le lac. Pendant les périodes sèches, les eaux souterraines peuvent assurer un débit de base, qui assure des débits minimaux dans les cours d'eau (CMI, 2010; Granneman, 2000). Les eaux souterraines contribuent également aux milieux humides et émergent directement dans certains lacs, y compris les Grands Lacs. À leur tour, les eaux des cours d'eau, des milieux humides et des lacs peuvent contribuer à la recharge des aquifères.

En raison du lien dynamique qui existe entre les eaux souterraines et les eaux de surface, les processus au sein des eaux souterraines et les impacts sur ceux-ci peuvent affecter la quantité et la qualité de l'autre. La qualité des eaux souterraines peut être influencée par des sources de contamination ponctuelles, notamment les sites d'enfouissement, les sites de déchets dangereux, les fosses septiques en mauvais état, les réservoirs de stockage souterrains, et par des sources diffuses, incluant les activités agricoles, urbaines et industrielles (CMI, 2010). Ces sources peuvent entraîner des menaces spécifiques pour la qualité des eaux souterraines, dont la contamination par les pesticides, les nutriments, les sels déglaçants, les agents pathogènes, les produits chimiques toxiques, les hydrocarbures et les produits pharmaceutiques (CMI, 2010). Selon le temps de résidence des eaux souterraines dans les aquifères, qui peut varier considérablement, les polluants peuvent être retenus sous la surface pendant des périodes allant de quelques semaines à plusieurs siècles, constituant ainsi une source potentielle de contaminants à long terme, dont l'assainissement peut s'avérer difficile et coûteux. Toutefois, dans certaines conditions (p. ex. des conditions d'oxydoréduction favorables), les aquifères peuvent également

constituer un lieu important de dégradation des contaminants. Cette dégradation peut générer des produits de dégradation nocifs ou inoffensifs; c'est pourquoi la compréhension des caractéristiques chimiques et des processus de dégradation est essentielle à l'évaluation de l'exposition potentielle. Dans bon nombre de cas, les eaux souterraines sont de qualité relativement bonne et contribuent, par leur résurgence, au maintien ou à l'amélioration de la qualité des eaux de surface (Grannemann et Van Stempvoort, 2016).

Selon les estimations, le système d'eaux souterraines du bassin des Grands Lacs contient 4 100 km³ d'eau douce, soit plus que le volume combiné des lacs Huron et Érié (Coon et Sheets, 2006; USEPA, 2006). En 2005, une quantité estimée à 1,5 milliard de gallons par jour (5,7 milliards de litres par jour) a été prélevée par pompage des aquifères du côté américain des Grands Lacs (Mills et Sharpe, 2010). De cette quantité totale, 43 % ont servi à l'irrigation pour l'agriculture et 14 %, à un usage industriel. Bien que la plupart des villes de la région des Grands Lacs dépendent des eaux de surface pour leur approvisionnement en eau, les eaux souterraines fournissent de l'eau potable à 8,2 millions de personnes et favorisent l'irrigation, les industries, y compris celle des boissons et de l'eau embouteillée, ainsi que les activités récréatives (Granneman, 2000). Bon nombre de ces prélèvements d'eaux souterraines devraient augmenter, en partie à cause du développement et des changements climatiques. L'augmentation des prélèvements d'eaux souterraines peut affecter à la fois la quantité et la qualité des eaux souterraines, ce qui peut restreindre la quantité d'eau disponible dans la région des Grands Lacs.

1.1 Contexte

L'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs (ARQEGL) initialement signé en 1972 était axé sur les eaux de surface, mais la version révisée de 1978 abordait les effets de multiples facteurs de stress sur les eaux souterraines. La version révisée comportait l'annexe 16, qui a été ajoutée dans le but d'aborder la « pollution causée par les eaux souterraines contaminées » (Francis, 1989). Toutefois, aucun processus officiel de production de rapport en vertu de cette annexe n'a été prévu. Le protocole de 1987 amendement l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs a modifié l'annexe 16 et exigé la présentation de rapports sur les progrès à partir de 1988 (USEPA, 1988). Le protocole de 2012 a ajouté l'annexe 8 pour aborder les eaux souterraines de façon plus globale (Environnement Canada, 2013b), ce qui englobait la préparation du rapport Science des eaux souterraines applicable à l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs : rapport de situation (Granneman et Van Stempvoort, 2016). Le présent document quinquennal de mise à jour est un complément au document exhaustif de 2016 (Granneman et Van Stempvoort, 2016), à titre de référence sur les eaux souterraines des Grands Lacs à l'intention des gouvernements du Canada et des États Unis, des décideurs, du milieu universitaire, de l'industrie et du grand public.

1.2 But du rapport

Rédigé par des chercheurs scientifiques du Canada et des États Unis, le rapport de 2016 constituait un rapport exhaustif sur la compréhension des eaux souterraines et de leur influence sur la qualité de l'eau des Grands Lacs ainsi que sur les lacunes dans les connaissances visant à établir les priorités scientifiques liées aux eaux souterraines (Granneman et Van Stempvoort, 2016). Le rapport de 2016 aborde les quatre principaux points de l'annexe 8 et fournit les principales conclusions pour chaque point :

1. Déterminer les répercussions des eaux souterraines sur l'intégrité chimique, physique et biologique de l'eau des Grands Lacs.

Conclusion: Les eaux souterraines améliorent la qualité de l'eau des Grands Lacs, mais en même temps, les eaux souterraines contaminées ont une incidence négative sur la qualité de l'eau des Grands Lacs. Une autre conclusion est qu'il existe encore des lacunes dans notre compréhension de la manière dont les eaux souterraines affectent la qualité de l'eau 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.

Conclusion: Les eaux souterraines constituent une zone de traitement ou de stockage contribuant à la protection de la qualité de l'eau des Grands Lacs, mais constituent également à long terme une source de contaminants ayant une incidence négative sur la qualité de 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.

Conclusion:

- Évaluation approfondie de l'émergence des eaux souterraines (quantité) à l'échelle régionale vers les eaux de surface dans le bassin des Grands Lacs;
- 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;
- Suivi et surveillance de la qualité des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs;
- Recherche approfondie sur les interactions à l'échelle locale entre les eaux souterraines et les eaux de surface;
- Élaboration d'outils plus efficaces pour le suivi, la surveillance et l'évaluation des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface à l'échelle locale;

- Recherche approfondie sur le rôle des eaux souterraines dans les habitats aquatiques du bassin des Grands Lacs;
 - Amélioration de la compréhension des effets de l'expansion urbaine sur les eaux souterraines;
 - Élaboration de modèles à plus grande échelle représentant les effets régionaux des eaux souterraines sur la qualité de l'eau des Grands Lacs.
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.

Conclusion: Il faudra mener d'autres études pour déterminer l'incidence d'autres facteurs environnementaux sur la qualité de l'eau des Grands Lacs.

L'annexe 8 exige que le Canada et les États Unis mettent à jour le rapport initial sur la science des eaux souterraines pertinente et disponible au moins une fois tous les six ans. Le présent rapport constitue une mise à jour du rapport initial de 2016, avec les objectifs suivants : 1) déterminer et décrire tout enjeu nouveau ou émergent, 2) décrire les progrès réalisés pour répondre aux besoins scientifiques énoncés dans le rapport de 2016, 3) mettre à jour les besoins scientifiques, au besoin, et 4) déterminer toute possibilité créée par de nouvelles connaissances ou des progrès techniques. Le présent rapport de mise à jour vise à mettre en évidence les progrès ou les contraintes importants et pertinents, plutôt qu'à fournir une évaluation exhaustive de la documentation ou à détailler les progrès scientifiques graduels. Les chapitres ont été principalement rédigés en 2020 et représentent une mise à jour de la documentation de 2016 à 2020, mais certains articles plus récents ont pu être ajoutés au cours du processus d'examen.

1.3 Aperçu des chapitres

Le présent rapport de mise à jour est organisé en fonction des différentes catégories d'étude, par chapitre, notamment:

Chapter 2 – Interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines

L'échange d'eau entre les systèmes d'eaux souterraines et d'eaux de surface détermine la façon dont les eaux souterraines affectent l'intégrité physique, chimique et biologique des Grands Lacs. La plupart des cours d'eau du bassin des Grands Lacs reçoivent des eaux souterraines. Les eaux souterraines émergent habituellement dans les Grands Lacs près de la rive, même si, à l'échelle locale, il peut y avoir un échange actif entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Cet échange peut se produire dans des zones présentant une géochimie différente, ce qui peut favoriser la dégradation des contaminants. Les eaux souterraines qui émergent dans les cours d'eau et les zones littorales peuvent assurer une stabilité thermique et ainsi appuyer les habitats. La compréhension des processus

d'échange entre les eaux souterraines et les eaux de surface sous tend les autres chapitres du rapport et concerne d'autres annexes de l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs. Les principaux besoins scientifiques abordés comprennent 1) la progression de la recherche sur les interactions à l'échelle locale, 2) la compréhension du rôle des eaux souterraines à l'appui de l'habitat, et 3) l'évaluation de l'émergence des eaux souterraines à l'échelle régionale dans les eaux de surface et les Grands Lacs.

Chapter 3 – Incidence des contaminants des eaux souterraines sur le bassin des Grands Lacs

Les contaminants des eaux souterraines, tels qu'ils sont définis ici, sont des substances indésirables, synthétiques et géogènes, qui sont transportées dans les eaux souterraines (ou infiltrées dans les eaux de surface) par les activités humaines, ou qui sont présentes à l'état naturel et atteignent des concentrations anormalement élevées dans l'eau en raison des activités humaines. Le chapitre 3 concerne les annexes 1 à 3 de l'AQEGL, qui traitent des secteurs préoccupants, de l'aménagement panlacustre et des produits chimiques sources de préoccupations mutuelles. Le chapitre porte sur le transport des eaux souterraines contaminées vers les eaux de surface du bassin des Grands Lacs ainsi que sur les répercussions potentielles sur les écosystèmes aquatiques de la région. Il se termine en indiquant que des progrès graduels sont réalisés par rapport aux cinq priorités énoncées dans le rapport de 2016 : 1) méthodes de détection et d'évaluation de l'émergence des eaux souterraines contaminées, 2) évaluation du potentiel de décontamination de la zone de transition, 3) sensibilité des organismes de la zone de transition aux contaminants, 4) répercussions écologiques réelles des contaminants des eaux souterraines, et 5) charge de contaminants dans les eaux des Grands Lacs à l'échelle régionale. Toutefois, les préoccupations relatives à certains contaminants présents dans les eaux souterraines, notamment les substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (PFAS), se sont considérablement accrues depuis, et ces aspects sont abordés dans le présent chapitre.

Chapter 4 – Eaux souterraines et éléments nutritifs

Les éléments nutritifs sont des contaminants importants des eaux souterraines, car leur omniprésence influence la qualité de l'eau. On sait peu de choses sur le transport des éléments nutritifs vers les Grands Lacs par les eaux souterraines. Le chapitre 4 concerne l'annexe 4 de l'AQEGL, qui traite des éléments nutritifs. Ce chapitre est axé sur la mise à jour des quatre besoins scientifiques indiqués dans le rapport de 2016 : 1) établir un lien entre la gestion des terres et la charge en éléments nutritifs des eaux souterraines, 2) comprendre le rôle du phénomène des points chauds (emplacements et moments constituant des points chauds biogéochimiques), 3) porter les renseignements propres au site à une échelle supérieure, et 4) compiler les évaluations des éléments nutritifs dans les eaux souterraines de l'ensemble du bassin. Les effets des apports d'éléments nutritifs dans les Grands Lacs constituant une préoccupation majeure depuis quelques années, des travaux considérables liés à ces besoins scientifiques ont été réalisés. D'importantes lacunes demeurent dans notre compréhension du rôle des apports d'éléments nutritifs

dans les eaux souterraines, et il existe de nouveaux besoins scientifiques qui ne figurent pas dans le rapport de 2016 et qui sont abordés au chapitre 4. Ce chapitre comprend également un tableau des priorités scientifiques mis à jour pour tenir compte de ces lacunes et de ces nouveaux besoins.

Chapter 5 – Eaux souterraines et habitats aquatiques

Le stockage et l'émergence des eaux souterraines affectent la disponibilité et la qualité des habitats aquatiques dans les lacs, les cours d'eau et les milieux humides du bassin des Grands Lacs en influençant les caractéristiques hydrologiques, thermiques et chimiques de ces eaux de surface. La contribution importante de l'émergence des eaux souterraines aux habitats aquatiques est reconnue dans les termes « écosystèmes dépendant des eaux souterraines », qui désignent une série de processus des eaux souterraines qui maintiennent le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques dans les lacs, les cours d'eau et les milieux humides. Le chapitre 5 concerne l'annexe 7 de l'AQEGL, qui porte sur les habitats et les espèces. Il fait le point sur les cinq besoins scientifiques prioritaires énoncés dans le rapport de 2016 : 1) cartographier la recharge de la nappe et l'émergence des eaux souterraines, 2) combiner les modèles d'eaux souterraines et les autres modèles écosystémiques, 3) évaluer l'importance de l'émergence des eaux souterraines sur la répartition des espèces et les caractéristiques des écosystèmes, 4) évaluer l'importance de l'effet des tendances spatiales de l'émergence des eaux souterraines sur les caractéristiques des écosystèmes, et 5) répertorier les écosystèmes qui sont vulnérables aux changements sur le plan de l'émergence des eaux souterraines. Les auteurs concluent que même si des efforts considérables ont été déployés pour dresser un inventaire des milieux humides côtiers des Grands Lacs, des modèles d'eaux souterraines sont toujours nécessaires pour simuler les différents aspects des eaux souterraines (émergence, débit et recharge). On a mis à jour les priorités afin de les axer davantage sur le lien entre les eaux souterraines et les habitats et d'assurer une meilleure intégration avec les priorités des autres chapitres.

Chapter 6 – Répercussions du développement urbain sur les eaux souterraines

Dans les villes, les infrastructures de surface, telles que les bâtiments et les zones pavées, et les infrastructures souterraines, telles que les fondations et les égouts pluviaux et sanitaires, ont des répercussions considérables sur la quantité et la qualité des eaux souterraines. Des études récentes sur l'hydrologie urbaine ont mis en évidence les interactions entre les eaux souterraines urbaines, les égouts sanitaires et les réseaux d'eaux pluviales. Ces interactions sont liées aux six besoins scientifiques prioritaires indiqués dans le rapport de 2016, notamment : 1) la collecte et l'analyse de données aux fins de gestion des ressources en eaux souterraines urbaines, 2) des renseignements quantitatifs sur les sources de contaminants, 3) la surveillance de la qualité des eaux souterraines et l'évaluation des risques potentiels pour la santé, 4) l'acquisition de données de base et la surveillance des bilans hydrologiques urbains, 5) des recherches sur le déplacement des eaux souterraines urbaines et le devenir des contaminants, et 6) une surveillance et des

recherches sur la gestion des eaux pluviales et l'assèchement. Le chapitre 6 concerne les annexes 1 et 3 de l'AQEGL, qui portent sur les secteurs préoccupants et les produits chimiques sources de préoccupations mutuelles, respectivement. Les auteurs de ce chapitre ont conclu que même si d'importantes études portant sur des sites en particulier ont été menées, il y a encore un manque de connaissances sur les eaux souterraines, ce qui entrave l'évaluation de la qualité des eaux souterraines urbaines et du cycle hydrologique en milieu urbain.

Chapter 7 – Répercussions des changements climatiques sur les eaux souterraines

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. Ce chapitre concerne l'annexe 9 de l'AQEGL, qui porte sur les répercussions des changements climatiques. Le chapitre 7 résume les recherches existantes associées aux répercussions potentielles des changements climatiques sur la qualité (y compris la température) et la quantité des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs. Il comprend également une analyse des impacts déjà constatés et prévus à l'avenir. Ce résumé est axé sur ce que l'on sait des répercussions des changements climatiques dans le bassin des Grands Lacs en ce qui concerne : 1) la recharge de la nappe souterraine, 2) le stockage des eaux souterraines, 3) l'émergence des eaux souterraines et l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface, 4) l'exacerbation des répercussions du développement urbain futur sur les eaux souterraines, 5) la qualité des eaux souterraines, et 6) l'écohydrologie (y compris la qualité des eaux de surface). Il existe encore de nombreuses incertitudes et lacunes dans les connaissances concernant les répercussions des changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines. Les auteurs suggèrent que les méthodes de modélisation soient normalisées pour les recherches concernant le bassin des Grands Lacs.

Références:

- Coon, W.F., and Sheets, R.A., 2006, Estimate of ground water in storage in the Great Lakes Basin, United States, 2006: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5180, 19 p., Available from <https://pubs.usgs.gov/sir/2006/5180/>
- Francis, G. 1989. Binational cooperation for Great Lakes water quality: a framework for the groundwater connection. *Chicago-Kent Law Review*. 65 (2): 359-373. Available from <https://scholarship.kentlaw.iit.edu/cklawreview/vol65/iss2/3>
- Grannemann G, Van Stempvoort D. (Eds.) 2016. Groundwater science relevant to the Great Lakes Water Quality Agreement: A status report. Prepared by the Annex 8 Subcommittee for the Great Lakes Executive Committee, Final version, May, 2016. Published (online) by Environment and Climate Change Canada and U.S. Environmental Protection Agency.
- Grannemann NG, Hunt RJ, Nicholas JR, Reilly TE, Winter TC. 2000. The importance of ground water in the Great Lakes Region. Lansing (MI): US Geological Survey Water-

Resources Investigations Report 00-4008. 19 p., Available from
<https://pubs.usgs.gov/publication/wri004008>

IJC, 2010: Great Lakes Science Advisory Board to the International Joint Commission (IJC). 2010. Groundwater in the Great Lakes Basin, 2010. Windsor (ON): IJC. 155 p.
Available from: <https://www.ijc.org/en/sab/groundwater-great-lakes-basin>

Mills, P.C., and Sharpe, J.B., 2010, Estimated withdrawals and other elements of water use in the Great Lakes Basin of the United States in 2005: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5031, 95 p., Available from
<https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5031/>.

US Environmental Protection Agency. 1988. U.S. progress in implementing the Great Lakes Water Quality Agreement. Chicago (IL): Great Lakes Program Office. Report EPA 905/9-89/006.

U.S. Environmental Protection Agency, 2023, Physical Features of the Great Lakes, accessed October 21, 2024 at <https://www.epa.gov/greatlakes/physical-features-great-lakes>.



Infiltration naturelle d'eau souterraine à la surface du sol à la tête de la zone de plage, montrant des taches de minéraux de fer ; Wasaga Beach, ON, Canada.

Crédit photo: James Roy, Environnement et Changement climatique Canada

2 Interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface

Howard Reeves¹, Serban Danielescu², Elizabeth Priebe³, Helen Zhang⁴

¹U.S. Geological Survey, Lansing, MI, USA

²Environnement et Changement climatique Canada, Fredericton, NB, Canada

³Laboratoires nucléaires canadiens, Chalk River, ON, Canada

⁴ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature et des Parcs de l'Ontario, Toronto, ON, Canada

2.1 Introduction

Dans le bassin des Grands Lacs, les eaux souterraines alimentent des réseaux d'eau potable privés et publics ainsi que l'industrie et l'agriculture. Elles assurent également le débit de base des cours d'eau et les échanges avec les milieux humides, étangs, lacs, etc. Ces échanges entre eaux souterraines et eaux de surface procurent de nombreux services et valeurs, par exemple en maintenant les débits ou les niveaux d'eau, en régulant la température de l'eau de surface et en assurant la qualité de l'habitat. Les eaux souterraines peuvent également transporter des contaminants ou des nutriments vers les eaux de surface. Les eaux souterraines qui passent dans les cours d'eau deviennent des affluents des Grands Lacs et contribuent à la qualité de l'eau de la zone littorale et des milieux humides côtiers des Grands Lacs. Le présent chapitre passe en revue les lacunes et besoins scientifiques recensés dans le chapitre sur les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface (Conant et coll., 2016) du rapport scientifique sur l'état des eaux souterraines de 2016 (Grannemann et van Stempvoort, 2016), afin de mettre en évidence les progrès récemment accomplis. Plus précisément, les sections suivantes passent en revue la documentation récente concernant l'identification et l'évaluation des émergences d'eaux souterraines (vers les eaux de surface), les impacts du développement foncier et du pompage sur les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface, l'évaluation des services rendus et du transport de contaminants par les eaux souterraines, ainsi que l'élaboration de bases de données cohérentes et leur importance. Le rôle général des eaux souterraines dans le bassin n'est pas abordé ici; le lecteur peut consulter le rapport de 2016 et d'autres documents pour obtenir cette information (par exemple, Grannemann et coll., 2000; Neff et Nicholas, 2005; Neff et coll., 2006). Il est essentiel de comprendre comment les eaux souterraines s'écoulent et comment elles interagissent avec les eaux de surface afin de comprendre leur importance dans le bilan hydrique des Grands Lacs ainsi que leur rôle dans le maintien de l'intégrité chimique, physique et biologique des écosystèmes aquatiques du bassin des Grands Lacs (Grannemann et van Stempvoort, 2016).

S'appuyant sur les éléments mis en évidence dans le chapitre sur les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface du rapport précédent (Conant et coll., 2016),

Conant et ses coauteurs (2019) ont présenté un cadre de modélisation conceptuel qui définit les facteurs hydrologiques, biogéochimiques et biologiques propres aux systèmes d'eaux souterraines et de surface. Le cadre met surtout en évidence les interactions entre les divers facteurs (figure 2.1). Le modèle conceptuel divise le système en trois composantes, qui donnent le contexte pour l'étude de la documentation présentée dans les sections suivantes du présent chapitre. Le système des eaux de surface comprend les cours d'eau, les lacs, les sources et les milieux humides. Le système des eaux souterraines se définit comme le sous-sol dont les interstices et les fissures sont saturés en eau, autrement dit, la partie du sous sol située sous la nappe phréatique. La zone de transition correspond au volume du sous-sol où l'eau se déplace entre les eaux souterraines et les eaux de surface et où les matériaux géologiques et les conditions peuvent modifier l'écoulement et l'état chimique ou écologique de l'eau (Conant et coll., 2019). La zone de transition comprend la zone hyporhéique, soit le volume de sédiments saturés en eau qui se trouvent au-dessous et de chaque côté d'un cours d'eau et où se produisent des échanges actifs entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Conant et coll. (2019) ont appliqué leur cadre de modélisation à trois études de cas : un panache simple de contamination d'eau souterraine se déversant dans la rivière Pine, dans le sud de l'Ontario; la pollution nutritive de sources diffuses dans la partie est de la baie Nottawasaga du lac Huron; une étude à l'échelle régionale des interactions dans bassin versant du ruisseau Duffins, en Ontario. Contrairement aux systèmes de classification précédents qui ne s'appliquent qu'à un certain contexte, celui de Conant et coll. est axé sur la détermination des processus critiques et peut donc s'appliquer à de nombreux contextes.

Evaluating GW-SW interactions

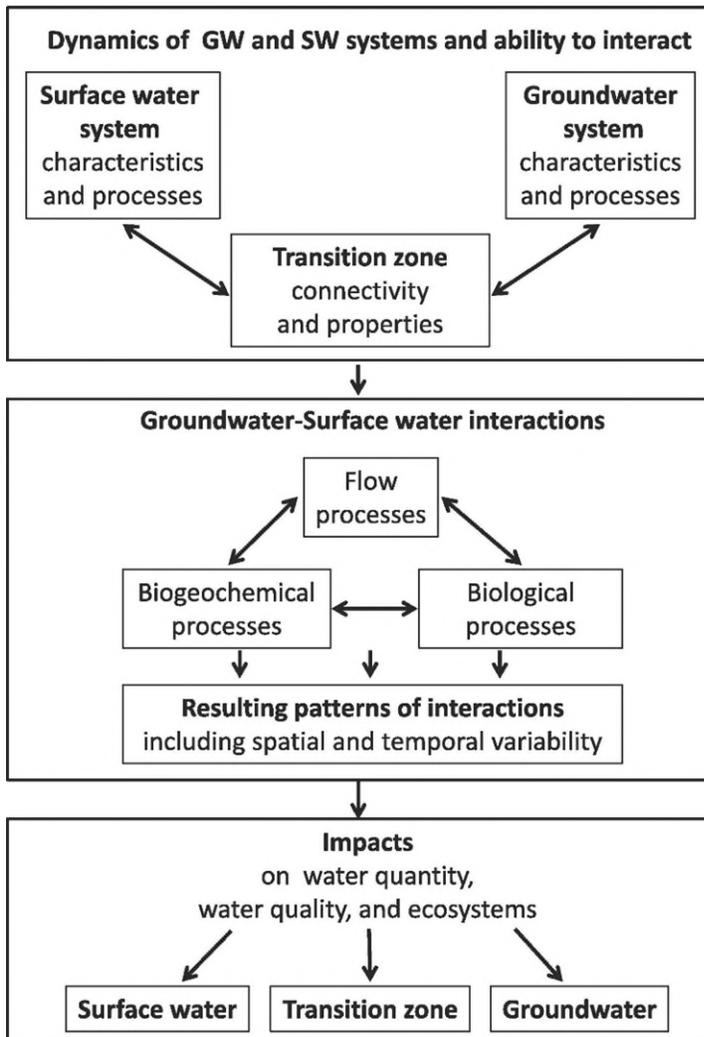


Figure 2.1 Schéma récapitulatif du cadre d'évaluation et de caractérisation des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface et des impacts potentiels sur les cours d'eau et les lacs, tiré de Conant et coll. (2019).

2.2 Besoins scientifiques prioritaires selon le rapport de 2016

Le rapport scientifique sur l'état des eaux souterraines de 2016 (Grannemann et van Stempvoort, 2016) a présenté les besoins scientifiques relevés par les auteurs de chaque

chapitre. Dans le chapitre sur les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface, cinq besoins scientifiques ont été relevés (tableau 2.1).

Tableau 2.1 Besoins scientifiques prioritaires concernant les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface, tableau tiré du rapport de 2016 (Grannemann et van Stempvoort, 2016).

Besoin scientifique prioritaire	Besoins et lacunes dans les connaissances
2A. Caractériser adéquatement l'hétérogénéité spatiale et la variabilité temporelle dans les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface.	<ul style="list-style-type: none"> • Il faut incorporer l'hétérogénéité locale, l'écoulement souterrain local et la dynamique de la zone de transition dans les modèles à l'échelle du bassin. • Il faut déterminer dans quelles circonstances les processus hydrologiques et biogéochimiques de petite échelle dans la zone de transition doivent être incorporés dans des modèles de bassin versant à grande échelle pour prédire de façon précise les effets. • Il faut mettre au point de meilleures méthodes de reconnaissance pour détecter de façon rapide et peu coûteuse les émergences d'eau souterraine vers l'eau de surface, en particulier pour les zones où l'eau souterraine est contaminée. • Les données de terrain sont insuffisantes pour alimenter des modèles d'écoulement des eaux souterraines/des eaux de surface pour obtenir des estimations précises des flux d'eau et des contaminants à l'échelle de la variabilité qui existe dans les bassins.
2B. Quantifier de façon exacte les émergences d'eaux souterraines vers les eaux de surface.	<ul style="list-style-type: none"> • Comprendre les effets du développement humain, de l'utilisation des terres et des changements dans les affectations des terres sur la quantité et la qualité des eaux souterraines qui émergent dans les Grands Lacs. • Élaborer des techniques pour mesurer facilement et directement les émergences d'eau souterraine profonde dans les Grands Lacs et pour évaluer l'importance relative des longs temps de séjour des eaux souterraines. • Améliorer les techniques pour mesurer de façon précise les composants individuels du bilan hydrologique (p. ex., évapotranspiration, écoulement de surface, écoulement de subsurface) pour réduire l'incertitude dans les estimations de l'émergence directe des eaux souterraines dans les eaux de surface des Grands Lacs. • La quantité totale des eaux souterraines qui émergent directement dans chaque Grand Lac est inconnue (la modélisation du lac Michigan a fourni quelques estimations). • De nombreux affluents des Grands Lacs ne sont pas jaugés ni surveillés; par conséquent, la quantité et la qualité des débits de base des ruisseaux et des rivières ne sont pas connues, ce qui limite la capacité d'estimer de façon exacte les débits de base, les charges de

	contaminants et l'émergence indirecte d'eau souterraine dans les Grands Lacs.
2C. Identifier les voies d'écoulement importantes des eaux souterraines vers les eaux de surface et délimiter les zones d'émergence des eaux souterraines.	<ul style="list-style-type: none"> • Il faut réévaluer les modèles conceptuels actuels quant aux voies d'écoulement et aux processus hydrologiques à l'échelle du bassin des Grands Lacs, et quant à leur habileté à évaluer de façon exacte les effets des sources diffuses et des sources ponctuelles de contamination des eaux souterraines. • Il faut effectuer la cartographie et la délimitation exhaustives et uniformes des systèmes d'écoulement des eaux souterraines qui émergent directement dans les Grands Lacs. • On manque d'études sur le terrain détaillées et de résolution élevée qui quantifient et délimitent l'émergence des eaux souterraines du littoral dans les Grands Lacs. • Il faut effectuer une plus grande étude et surveillance des zones d'émergence et des voies d'écoulement des eaux souterraines pour déterminer les zones d'émergence élevée et préférentielle des eaux souterraines vers les plans d'eau de surface (ruisseaux, rivières, lacs et milieux humides). • Pour la plupart des systèmes d'écoulement souterrain, on ne connaît pas l'importance relative des systèmes d'écoulement peu profond et profond dans l'apport émergeant dans les plans d'eau de surface. En général, l'eau souterraine peu profonde risque davantage d'être contaminée que l'eau souterraine profonde.
2D. Déterminer les relations essentielles entre l'émergence des eaux souterraines et la santé de l'écosystème aquatique.	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer la compréhension des quantités minimales et des seuils de débit d'eau souterraine requis pour soutenir les écosystèmes locaux dans différentes eaux de surface. • Améliorer la compréhension du devenir des contaminants et des processus de transport des contaminants dans les eaux souterraines et les zones de transition, et évaluer les effets écologiques des émergences d'eau souterraine. • Nous manquons d'information quant à l'emplacement des habitats par rapport à l'émergence d'eau souterraine et à l'émergence d'eau souterraine contaminée et par rapport aux temps critiques pour les expositions de la vie aquatique. • La cartographie et l'analyse de corrélation des écosystèmes et des répartitions de la vie aquatique par rapport aux zones d'émergence/de recharge des eaux souterraines sont nécessaires. • Déterminer les observations et les paramètres clés sur le terrain qui sont nécessaires pour reconnaître et surveiller le tarissement du débit par les puits de pompage.
2E. Caractériser et comprendre le rôle des processus de la zone de transition sur la qualité des	<ul style="list-style-type: none"> • Élaborer des techniques d'évaluation qui peuvent séparer les effets des émergences d'eau souterraine sur l'eau de surface des effets de la dilution et du mélange avec l'eau de surface contaminée par d'autres sources. • Comprendre le rôle du stockage temporaire dans la zone hyporhéique dans l'atténuation des contaminants des eaux souterraines qui migrent en aval à partir de leurs points d'émergence dans les rivières

eaux de surface.	et les ruisseaux. Déterminer dans quelle mesure les zones de transition atténueront les panaches de contaminants dans les eaux souterraines avant leur émergence dans les eaux de surface.
------------------	--

Dans le rapport de 2016, les lacunes dans les connaissances et les besoins scientifiques présentés dans tous les chapitres ont été regroupés en principaux besoins scientifiques. Le présent chapitre s'organise autour des principaux besoins 1, 4 et 6 qui concernent les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Ces principaux besoins sont présentés au tableau 2.2.

Tableau 2.2 Principaux besoins de recherche concernant les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface selon le rapport de 2016 (Grannemann et van Stempvoort, 2016).

Secteurs des principaux besoins scientifiques	Besoins scientifiques prioritaires identifiés dans les chapitres 2 à 7 du rapport de 2016	Chapitre pertinent du rapport de 2016
1. Évaluation de l'émergence d'eau souterraine vers les eaux de surface à l'échelle régionale	2B. Quantifier de manière précise les émergences d'eaux souterraines vers les eaux de surface.	2
	2C. Définir les voies d'écoulement importantes des eaux souterraines vers les eaux de surface et délimiter les zones d'émergence d'eaux souterraines.	2
	5A. Cartographier la recharge de la nappe et l'émergence de l'eau souterraine.	5
4. Recherche approfondie sur les interactions à l'échelle locale entre les eaux souterraines et les eaux de surface	2A. Caractériser adéquatement l'hétérogénéité spatiale et la variabilité temporelle dans les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface.	2
	2E. Caractériser et comprendre le rôle des processus de la zone de transition sur la qualité des eaux de surface.	2
	3B. Évaluer le potentiel de décontamination de la zone de transition.	3
	4B. Comprendre le rôle du phénomène des points chauds sur les écoulements d'éléments nutritifs dans l'eau souterraine.	4

6. Recherche approfondie sur le rôle des eaux souterraines dans les habitats aquatiques du bassin des Grands Lacs	2D. Déterminer les relations essentielles entre l'émergence des eaux souterraines et la santé de l'écosystème aquatique.	2
---	--	---

2.3 Mise à jour et examen des besoins scientifiques prioritaires et des lacunes dans les connaissances

Dans cette section, nous abordons brièvement des exemples tirés de la documentation concernant les principaux besoins scientifiques.

2.3.1 Évaluation de la résurgence d'eau souterraine vers les eaux de surface à l'échelle régionale

Les études sur la dynamique des systèmes régionaux d'eaux souterraines aident les gestionnaires, les décideurs et les parties prenantes à comprendre le rôle des eaux souterraines dans l'approvisionnement en eau, le maintien des milieux humides, le débit des cours d'eau et le niveau des lacs, ainsi que le transport des nutriments et des contaminants.

En 2018, le Conseil consultatif scientifique des Grands Lacs de la Commission mixte internationale a reconnu que la première étape de l'évaluation des effets des eaux souterraines sur la quantité et la qualité de l'eau à l'échelle du bassin des Grands Lacs consistait à élaborer un modèle satisfaisant des contributions des eaux souterraines au bilan hydrique du système et s'est penché sur la façon d'y parvenir en intégrant les processus hydrologiques de surface et souterrains à l'échelle du bassin (Great Lakes Science Advisory Board, 2018). Le Comité de coordination de la recherche du Conseil consultatif scientifique des Grands Lacs de la Commission mixte internationale a donc dirigé l'élaboration d'un cadre conceptuel pour les modèles numériques des eaux souterraines et des eaux de surface à l'échelle du bassin. Le cadre offre des recommandations scientifiques et techniques détaillées pour l'élaboration de modèles numériques et met en évidence le besoin d'obtenir de meilleures données sur les bilans hydriques dans les régions à forte utilisation d'eau et d'investir davantage dans la surveillance et la modélisation à l'échelle du bassin pour une gestion durable de l'eau. Selon le cadre, il faut également disposer d'outils à résolution saisonnière ou annuelle qui permettent aux parties prenantes et aux gestionnaires de ressources de répondre à des questions précises (Great Lakes Science Advisory Board-Research Coordination Committee, 2022).

Un modèle hydrogéologique très détaillé a été développé dans le cadre du Southern Ontario Groundwater Project (Frey et coll., 2020). Ce modèle simule les débits mensuels des eaux de surface et des niveaux des eaux souterraines à diverses résolutions spatiales et

temporelles. Le modèle s'appuie sur un cadre hydrostratigraphique détaillé établi pour la zone d'étude. Les résultats présentent peu de différence entre les modèles à haute et à basse résolution. L'étude a servi de cadre à celle de Xu et coll. (2021) qui ont créé le premier modèle totalement intégré des eaux souterraines et des eaux de surface pour l'ensemble du bassin des Grands Lacs. Ce modèle, qui tient compte de la saisonnalité hydrologique, a servi à caractériser les interactions entre les eaux souterraines et les cinq Grands Lacs dans un scénario de normales climatiques mensuelles. Les résultats de la simulation indiquent que l'émergence d'eau souterraine directement dans les lacs ne représente qu'une faible part de l'apport total d'eau aux lacs, allant de 0,6 % pour le lac Ontario à 1,3 % pour le lac Michigan, la moyenne globale étant de 0,8 % pour l'ensemble des Grands Lacs (Xu et coll., 2021). Ces valeurs cadrent bien avec les estimations de Grannemann et coll. (2000). Les résultats de la simulation montrent aussi que les interactions entre les eaux souterraines et les lacs sont plus fortes le long du littoral et qu'elles varient selon les fluctuations saisonnières du niveau des lacs et de la nappe phréatique dans les régions riveraines. En hiver, l'émergence directe d'eau souterraine domine les interactions entre les eaux souterraines et les lacs, tant dans les zones distales que dans les zones littorales du lit des lacs. En été, les effets combinés de l'élévation du niveau des lacs et de l'abaissement de la nappe phréatique terrestre réduisent considérablement l'émergence directe d'eau souterraine dans les zones littorales. L'émergence directe d'eau souterraine varie également dans l'espace : elle est plus élevée dans les zones contenant une épaisse couche de sédiments phanérozoïques que dans les zones de socle rocheux précambrien. Les résultats de ces études illustrent la variabilité spatiale et temporelle de l'émergence directe d'eau souterraine dans les Grands Lacs, ce qui est important pour comprendre son effet sur la qualité de l'eau et l'écologie des zones littorales.

L'un des défis de l'analyse à l'échelle régionale consiste à simuler le transport des contaminants par les eaux souterraines à une résolution supérieure à celle d'un modèle régional qui calcule nécessairement des conditions moyennes. Feinstein et coll. (2018) ont mis au point des méthodes d'extraction de sous modèles et les ont appliquées à un modèle régional existant de l'écoulement des eaux souterraines du bassin du lac Michigan afin d'estimer les temps de déplacement et les répartitions par âge des eaux souterraines. Les auteurs ont ainsi étudié cinq sous bassins du bassin du lac Michigan et en ont estimé les répartitions par âge des eaux souterraines à l'aide d'un algorithme de suivi des particules. Cette étude montre comment le modèle régional d'écoulement des eaux souterraines peut être utilisé dans une analyse plus locale pour fournir des données pertinentes sur le devenir et le transport dans le système des eaux souterraines.

Knights et coll. (2017) ont constaté que l'émergence directe d'eaux souterraines et leur potentiel d'apport en nutriments aux Grands Lacs le long du littoral américain des Grands Lacs étaient les plus élevés pour le lac Érié et les plus faibles pour le lac Supérieur. Ces auteurs ont utilisé une approche de bilan hydrique pour estimer la vulnérabilité aux apports directs en nutriments. Cette approche est plus pertinente pour les aquifères libres peu profonds situés à proximité des Grands Lacs. Les auteurs ont évalué la vulnérabilité d'après le débit d'émergence estimé et l'utilisation des terres dans les zones de recharge d'eaux souterraines qui contribuent directement aux lacs, en présumant que l'utilisation agricole

des terres apporte des nutriments au système. Les auteurs ont également effectué de l'échantillonnage dans un site se trouvant dans une zone vulnérable près du lac Érié : les débits d'émergence mesurés sur le terrain étaient inférieurs à ceux estimés dans le bilan hydrique. Les auteurs ont souligné l'importance de l'échantillonnage sur le terrain pour comprendre et quantifier les flux tant à l'échelle locale qu'à l'échelle régionale.

Niu et coll. (2014) ont évalué les composantes du bilan hydrique et les changements dans le stockage au moyen d'un modèle couplé des processus souterrains et de surface terrestre (PAWS) appliqué aux bassins versants des rivières Grand et Saginaw, au Michigan. Le modèle a permis de simuler différents composantes et états hydrologiques, notamment le ruissellement diffus, l'écoulement dans les cours d'eau, les eaux souterraines, l'évapotranspiration, l'humidité et la température du sol, les changements dans le stockage, ainsi que la dynamique de croissance de la végétation. Les résultats du modèle correspondent bien aux observations sur le terrain et aux données MODIS et GRACE. L'analyse des tendances indique que le stockage a augmenté dans les deux bassins versants au cours de la dernière décennie. L'étude a également montré que les changements dans le stockage d'eau étaient dominés par les changements dans les volumes d'eau dans la zone vadose et l'aquifère libre et que les eaux de surface et les eaux souterraines dans l'aquifère captif y contribuaient peu.

2.3.2 Développement de la recherche sur les interactions à l'échelle locale entre les eaux souterraines et les eaux de surface

Les eaux souterraines pouvant transporter des contaminants ou des nutriments vers les eaux de surface et les Grands Lacs, la présente section se concentre sur la façon dont la compréhension des processus à l'échelle locale peut aider à gérer les effets potentiels de ces contaminants et nutriments. On s'attend à ce que les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface à l'échelle du bassin versant soient plus complexes que celles décrites à l'échelle régionale. Les évaluations à l'échelle régionale ne rendent pas compte des variations dans les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface qui dépendent des variations à l'échelle du bassin versant et à l'échelle locale de la géologie, de la topographie, de l'occupation des sols, de l'utilisation de l'eau, de la géométrie des plans d'eau et de la conductance de leur lit. En raison de ces facteurs, un même cours d'eau peut avoir des tronçons absorbants (qui reçoivent des eaux souterraines émergentes) et des tronçons infiltrants (qui perdent de leur eau qui s'infiltré dans le sol), alors qu'à l'échelle régionale, le cours d'eau serait soit absorbant, soit infiltrant. À l'échelle locale, les échanges hyporhéiques deviennent importants et différentes parties d'un cours d'eau peuvent présenter des conditions absorbantes ou infiltrantes, qui varient selon les fluctuations du niveau de la nappe phréatique ou du débit du cours d'eau. Les eaux souterraines qui émergent dans les cours d'eau et les Grands Lacs ont suivi des trajets d'écoulement plus ou moins longs jusqu'au point d'émergence, ce qui donne un mélange d'eaux géochimiquement différentes. Il est utile de comprendre la relation entre les trajets d'écoulement des eaux souterraines, les échanges entre ces eaux et les eaux de surface et leur incidence, ainsi que l'incidence des trajets sur ces mélanges géochimiques, pour

évaluer les avantages que procurerait la prise de mesures visant à atténuer la contamination des eaux souterraines dans un bassin versant.

Études à l'échelle des bassins versants

Plusieurs études récentes ont porté sur l'émergence d'eaux souterraines dans les Grands Lacs ou d'autres grands lacs de l'Ontario. Wallace et coll. (2020) ont quantifié l'émergence d'eaux souterraines dans un grand lac intérieur, le lac Simcoe, en appliquant un modèle de bilan de masse à l'équilibre aux données de radon 222 (^{222}Rn) recueillies le long de la rive du lac. Ils ont observé que l'émergence d'eau souterraine dans le lac Simcoe variait beaucoup selon les endroits et estimé qu'elle représentait de 7 à 16 % de l'apport total des affluents pendant l'été. Ji et coll. (2017) ont obtenu des résultats semblables pour l'émergence d'eau souterraine dans la baie Nottawasaga (lac Huron) qu'ils ont estimée à 5 et 13 % du débit annuel de la rivière Nottawasaga. Dans les deux études, l'émergence d'eau souterraine dans les plans d'eau récepteurs variait dans l'espace : les débits d'émergence étaient généralement plus élevés le long du littoral et diminuaient avec la distance au large, conformément au régime général d'écoulement des eaux souterraines. Les études ont toutefois montré que l'hydrogéologie locale et la lithologie des sédiments jouaient un rôle important dans la localisation des zones de fort débit d'émergence. Les résultats d'études de ce genre peuvent éclairer les mesures de gestion potentielles et la conception de plans d'échantillonnage pour d'autres lacs glaciaires.

La plupart des études sur l'émergence d'eau souterraine dans les Grands Lacs ou d'autres lacs dans le bassin des Grands Lacs se sont concentrées sur l'émergence diffuse d'eaux souterraines, mais des émergences ponctuelles pourraient être importantes dans certaines zones, comme le montrent les dolines remarquables d'où s'écoulent des eaux souterraines de l'aquifère sous-jacent dans le lac Huron (Baskaran et coll., 2016). Bien que le volume d'eau s'écoulant dans le lac à partir de ces dolines soit relativement faible par rapport aux autres apports d'eau au lac, l'eau souterraine anoxique, réductrice, à fortes teneurs en sulfate et en chlorure des dolines qui s'écoule dans le lac crée des conditions propices à la formation de tapis microbiens particuliers, semblables à ceux que l'on trouve dans les cheminées marines des grands fonds marins. De fortes concentrations de chlorure sont également observées dans le lac Ontario, et Mackie et coll. (2022) ont récemment étudié l'eau souterraine en tant que voie de transport de ce contaminant. De nombreuses études ont été effectuées sur les sources et apports de chlorure au lac Ontario, mais elles portaient soit sur les eaux de surface, soit sur les eaux souterraines, indépendamment les unes des autres, sans intégration ni prise en compte de leurs interactions. Mackie et coll. (2022) ont souligné la nécessité d'une surveillance à l'échelle régionale du chlorure et de son transport dans les eaux souterraines et les eaux de surface pour soutenir la mise au point de pratiques exemplaires d'utilisation des sels de voirie.

Larocque et coll. (2019) ont mené une étude sur les échanges entre les eaux souterraines et un cours d'eau dans la partie inférieure du sous bassin versant du ruisseau Whitemans (130 km²), un affluent de la rivière Grand situé dans le sud de l'Ontario. Ils se sont servis d'un

modèle couplé surface terrestre-eaux souterraines pour évaluer la dynamique des eaux souterraines locales et les impacts potentiels du changement climatique (Larocque et coll., 2019). L'analyse du bilan hydrique indique une infiltration et une recharge nulles ou très faibles l'été, le débit de base du cours d'eau étant probablement alimenté par des niveaux élevés d'eau souterraine dus à la fonte des neiges. Ces niveaux d'eau souterraine diminuent lentement au cours de cette période. Bien que le volume moyen déclaré d'eau souterraine pompée soit faible par rapport aux autres flux du bilan hydrique, le volume moyen de pompage autorisé (principalement à des fins agricoles) était de l'ordre de la recharge moyenne, ce qui présente un risque d'assèchement du ruisseau pendant les périodes d'étiage.

Persaud et coll. (2020) ont étudié la réaction possible du système des eaux souterraines aux changements climatiques à l'échelle du bassin versant. Ils ont appliqué le modèle couplé eaux souterraines-eaux de surface au bassin versant supérieur du ruisseau Parkhill, en Ontario. Plusieurs projections climatiques ont été appliquées au modèle après étalonnage pour produire des prévisions des composantes mensuelles du bilan hydrique au milieu du siècle. Les valeurs simulées pour les eaux souterraines comprenaient le niveau de la nappe phréatique (charge hydraulique), le débit d'émergence et le flux net des échanges avec les eaux de surface. Les résultats montrent que le débit de surface est plus sensible au forçage climatique et change davantage que le niveau des eaux souterraines ou le flux net des échanges. Les auteurs relèvent la résilience générale du système des eaux souterraines, tout en soulignant que des changements localisés sont possibles. Le chapitre 7 du présent rapport présente plus en détail les effets du climat sur les eaux souterraines.

Études sur le terrain et de la zone hyporhéique

Des études récentes à l'échelle locale ont porté sur diverses interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surfaces. Elles montrent que des flux dynamiques locaux provoqués par des changements saisonniers, des tempêtes et des vagues influent sur la qualité des eaux souterraines et des eaux de surface en créant des conditions réactives qui diffèrent des conditions moyennes à long terme. Ces conditions réactives peuvent jouer sur les réactions d'oxydoréduction et les processus biogéochimiques et ainsi modifier le devenir des nutriments et des contaminants dans les eaux souterraines. Ces études à l'échelle locale ont porté notamment sur un milieu humide pollué au sulfate (Ng et coll., 2017, 2020) et sur des plages du lac Érié (Rakhimbekova et coll., 2018) et du lac Ontario (Malott et coll., 2017).

Levison et coll. (2014) ont mis au point un modèle entièrement intégré d'écoulement des eaux souterraines et des eaux de surface pour simuler le débit de quatre sources (situées à différentes altitudes) qui émergent du socle rocheux fissuré et qui abritent une espèce en voie de disparition au Québec. Girard et coll. (2015) ont ainsi simulé le débit des sources dans le passé récent et divers scénarios de changements climatiques futurs, en vue d'une modélisation écologique des populations de salamandres. Les résultats indiquent que le débit des sources augmentera d'ici 2050 et qu'il continuera à offrir un habitat à l'espèce. Les auteurs remarquent toutefois que d'autres facteurs, comme des changements dans

l'utilisation des terres ou des augmentations des prélèvements d'eau, pourraient modifier le débit des sources et les habitats qu'elles offrent. Cette approche de modélisation hydrologique pourrait servir à la recherche dans d'autres domaines, car elle permet d'étudier la durabilité des écosystèmes dépendants des eaux souterraines.

De nombreuses études ont permis d'améliorer la quantification de l'émergence d'eaux souterraines dans les eaux de surface par la séparation des débits de base à l'aide de traceurs ou d'autres méthodes. Afin de déterminer l'approche la plus optimale, Cheng et coll. (2022) ont estimé le débit de base en appliquant des méthodes graphiques et de filtrage numérique existantes à des données de débit réelles d'une station de jaugeage dans le bassin versant du ruisseau Alder (Ontario) et à des données de débit simulées par le modèle HydroGeoSphere pour dix sites d'étude dans le même bassin versant. Les résultats indiquent que les hydrogrammes du débit de base varient selon les saisons et dans l'espace le long du ruisseau et que la meilleure méthode d'estimation du débit de base varie selon des facteurs environnementaux comme l'utilisation des terres, la topographie, la géologie, la pente et des paramètres hydrauliques. Des études de terrain utilisant des traceurs non conventionnels ont également été menées pour déterminer la source de contamination d'eaux souterraines (Popp et coll., 2021). Cette étude a utilisé des édulcorants artificiels pour distinguer entre la contamination des eaux souterraines par le lixiviat d'un site d'enfouissement et la contamination par des eaux usées, et a montré l'importance de la sinuosité des cours d'eau et des flux hyporhéiques dans un milieu relativement homogène. Comme le souligne le cadre conceptuel de Conant et coll. (2019), pour comprendre comment les contaminants ou les nutriments sont transportés de la surface terrestre aux Grands Lacs, il faut comprendre le système des eaux souterraines, les interactions entre celles-ci et les eaux de surface et les processus de transport dans les eaux de surface. Pour ce faire, il faut élaborer des programmes de surveillance et d'échantillonnage des eaux souterraines et des eaux de surface, dans lesquels la stratégie d'échantillonnage peut influencer sur la façon dont les conditions dans la zone de transition entre un aquifère et un cours d'eau sont évaluées, comme le rapportent Lee-Cullin et coll. (2018). Ces auteurs ont étudié deux plans d'échantillonnage : l'échantillonnage local à haute résolution temporelle consistant à recueillir de nombreux échantillons à quelques sites dans un réseau fluvial afin de déterminer la variabilité à l'échelle locale, et l'échantillonnage longitudinal consistant à recueillir un nombre semblable d'échantillons à un plus grand nombre de sites le long du réseau fluvial afin d'évaluer la dynamique de l'écoulement et des flux de contaminants. Les auteurs ont constaté que l'échantillonnage longitudinal a donné une meilleure représentation de l'état général du réseau fluvial, car l'échantillonnage d'un plus grand nombre de sites, même si le même nombre d'échantillons a été prélevé que dans l'échantillonnage local, a permis de caractériser le profil biogéochimique du réseau.

Des recherches ont également été menées pour mettre au point de meilleures méthodes de reconnaissance afin de caractériser rapidement et à moindre coût l'hétérogénéité spatiale et la variabilité temporelle des échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Par exemple, Robinson et d'autres (2022) ont réalisé une étude démontrant l'efficacité de l'imagerie combinant résistivité en courant continu et polarisation induite (DC-IP) pour

caractériser l'architecture du lit des cours d'eau et interpréter les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface. L'étude, qui a été réalisée le long d'un tronçon de 50 mètres dans la partie amont du ruisseau Kintore (Ontario), a consisté en un relevé DC-IP 3D subaquatique à haute résolution, en des mesures correspondantes des différences de température et des gradients de charge hydraulique verticale et en l'échantillonnage d'eau interstitielle. L'étude met en évidence les avantages complémentaires de l'imagerie combinant résistivité en courant continu et polarisation induite, celle-ci renseignant plus clairement sur la minéralogie que la résistivité en courant continu, qui est tributaire de la qualité variable de l'eau interstitielle résultant de la variabilité spatiale des trajets d'écoulement, des temps de séjour et de la géochimie des eaux souterraines.

2.4 Résumé et besoins scientifiques prioritaires

Les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface relient le système des eaux souterraines aux eaux de surface et aux Grands Lacs. Les eaux souterraines constituent souvent une source d'eau de haute qualité qui atténue la contamination des eaux de surface, stabilise les températures des eaux de surface et fournit de l'eau potable dans l'ensemble du bassin des Grands Lacs. Toutefois, dans certaines parties du bassin, les eaux souterraines sont contaminées par des nutriments, des contaminants géogéniques ou des polluants anthropiques. Comprendre comment ces contaminants se déplacent dans le système des eaux souterraines aiderait à évaluer le risque qu'ils représentent pour les Grands Lacs. Les principaux besoins en recherche sur les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface recensés dans le rapport de 2016 (Conant et coll., 2016; Grannemann et van Stempvoort, 2016) ne sont pas comblés malgré les progrès accomplis dans plusieurs domaines. De récents travaux de modélisation à l'échelle régionale ont perfectionné des modèles régionaux de l'émergence d'eau souterraine vers les eaux de surface dans le bassin, et ces modèles pourront servir dans des études approfondies. Par exemple, on pourrait étendre les modèles régionaux qui simulent les conditions saisonnières à des modèles transitoires capables de simuler la réponse aux conditions climatiques observées ou prévues. On pourrait mettre au point des méthodes permettant de relier les données mesurées et les données modélisées aux échelles spatiales du site, du bassin versant et de la région. Plusieurs études relèvent des lacunes en matière de recherche sur la mise au point de méthodes permettant d'améliorer les stratégies d'échantillonnage.

Références:

- Baskaran, M., Novell, T., Nash, K., Ruberg, S.A., Johengen, T., Hawley, N., Klump, J.V., and Biddanda, B.A., 2016, Tracing the Seepage of Subsurface Sinkhole Vent Waters into Lake Huron Using Radium and Stable Isotopes of Oxygen and Hydrogen: *Aquatic Geochemistry*, v. 22, no. 4, p. 349-374, <https://doi.org/10.1007/s10498-015-9286-7>.
- Cheng, S., Tong, X., Illman, W.A., 2022, Evaluation of baseflow separation methods with real and synthetic streamflow data from a watershed: *Journal of Hydrology*, v. 613, Part A, p. 128279, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128279>.

- Conant, B., Jr., Robinson, C.E., Hinton, M.J., and Russell, H.A.J., 2019, A framework for conceptualizing groundwater-surface water interactions and identifying potential impacts on water quality, water quantity, and ecosystems: *Journal of Hydrology*, v. 574, p. 609-627, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.050>.
- Conant, B., Jr., Robinson, C.E., Hinton, M.J., and Russell, H.A.J., 2019, A framework for conceptualizing groundwater-surface water interactions and identifying potential impacts on water quality, water quantity, and ecosystems: *Journal of Hydrology*, v. 574, July, p. 609-627, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.050>.
- Conant B, Danielescu S, Reeves H, Coulibaly P. 2016. Groundwater/surface water interaction. Chapt. 2 in Grannemann, G. and Van Stempvoort, D. (Eds.), *Groundwater science relevant to the Great Lakes Water Quality Agreement: A status report*. Final version, May, 2016. Published (online) by Environment and Climate Change Canada and U.S. Environmental Protection Agency. <https://binational.net/2016/06/13/groundwater-science-f/>.
- Frey S.K., Khader, O., Taylor, A., Erler, A.R., Lapen, D.R., Sudicky, E.A., Berg, S.J., and Russell, H.A.J. 2020. A fully integrated groundwater-surface-water model for southern Ontario. In Russell, H.A.J. and Kjarsgaard, B.A. Eds. *Southern Ontario groundwater project 2014-2019: summary report*. Geological Survey of Canada, Open File 8536, 231-245. <https://doi.org/10.4095/321108>.
- Girard, P., Levison, J., Parrott, L., Larocque, M., Ouellet, M-A., and Green, D., 2015, Modeling cross-scale relationships between climate, hydrology, and individual animals: generating scenarios for stream salamanders: *Frontiers in Environmental Science*, v. 3, article 51, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00051>.
- Great Lakes Science Advisory Board. 2018. *Great Lakes Surface and Groundwater Model Integration Review Literature Review, Options for Approaches and Preliminary Action Plan for the Great Lakes Basin*. International Joint Commission, Windsor, Ontario, Canada. 62 pp. Available at https://ijc.org/sites/default/files/2019-01/Great_Lakes_Surface_and_Groundwater_Model_Integration_Review_Oct2018.pdf.
- Great Lakes Science Advisory Board-Research Coordination Committee, 2022. *Development of a Great Lakes Groundwater and Surface Water Conceptual Framework*. Prepared by LimnoTech for the International Joint Commission. Available at https://ijc.org/sites/default/files/SAB-RCC_GroundwaterSurfaceWaterModelReport_2022.pdf.
- Grannemann, N.G., Hunt, R.J, Nicholas, J.R., Reilly, T.E., and Winter, T.C., 2000, The importance of ground water in the Great Lakes Region, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 2000-4008, 14 p., <https://doi.org/10.3133/wri004008>.

- Grannemann, N.G, Van Stempvoort D. (Eds.) 2016. Groundwater science relevant to the Great Lakes Water Quality Agreement: A status report. Prepared by the Annex 8 Subcommittee for the Great Lakes Executive Committee, Final version, May, 2016. Published (online) by Environment and Climate Change Canada and U.S. Environmental Protection Agency. <https://binational.net/2016/06/13/groundwater-science-f/>.
- Ji, T, Peterson, R.N., Befus, K.M., Peterson, L.E., and Robinson, C.E., 2017, Characterization of groundwater discharge to Nottawasaga Bay, Lake Huron with hydraulic and ^{222}Rn measurements: *Journal of Great Lakes Research*, v. 43, no. 5, p. 920-929, <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2017.07.003>.
- Knights, D., Parks, K.C., Sawyer, A.H., David, C.H., Browning, T.N., Danner, K.M., and Wallace, C.D., 2017, Direct groundwater discharge and vulnerability to hidden nutrient loads along the Great Lakes coast of the United States: *Journal of Hydrology*, v, 554, p. 331-341, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.001>.
- Larocque, M., Levison, J., Gagné, S., and Saleem, S. (2019). Groundwater use for agricultural production—current water budget and expected trends under climate change. Final report submitted to MAPAQ and OMAFRA, <https://archipel.uqam.ca/13329/>.
- Lee-Cullin, J.A., Zarnetske, J.P., Ruhala, S.S., and Plont, S., 2018, Toward measuring biogeochemistry within the stream-groundwater interface at the network scale- An initial assessment of two spatial sampling strategies: *Limnology and Oceanography- Methods*, v. 16, no. 11, p. 722-722, <https://doi.org/10.1002/lom3.10277>.
- Levison, J., Larocque, M., and Ouellet, M.A., 2014, Modeling low-flow bedrock springs providing ecological habitats with climate change scenarios: *Journal of Hydrology*, v. 515, p. 16-28, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.042>.
- Liu, Q., Anderson, E.J., Zhange, Y., Weinke, A.D., Knapp, K.L., Biddanda, B.A., 2018, Modeling reveals the role of coastal upwelling and hydrologic inputs on biologically distinct water exchanges in a Great Lakes estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 209: 41-55. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.05.014>.
- Mackie, C., Lackey, R., Levison, J., Rodrigues, L. 2022, Groundwater as a source and pathway for road salt contamination of surface water in the Lake Ontario Basin: A review. *Journal of Great Lakes Research*, v. 48, no. 1, p. 24-36, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0380133021002860>.
- Malott, S., O'Carroll, D.M., and Robinson, C.E., 2017, Influence of instantaneous and time-averaged groundwater flows induced by waves on the fate of contaminants in a beach aquifer: *Water Resources Research*, v. 53, no. 9, p. 7987-8002, <https://doi.org/10.1002/2017WR020948>.
- Neff BP, Nicholas JR. 2005. Uncertainty in the Great Lakes water balance. 42 p. Reston (VA): US Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5100. 42 p., <https://doi.org/10.3133/sir20045100>.

- Neff BP, Piggott AR. R.A. Sheets. 2006. Estimation of shallow ground-water recharge in the Great Lakes Basin. US Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5284. 20 p., <https://pubs.usgs.gov/sir/2005/5284/>.
- Niu, J., Shen, C., Li, S. G., & Phanikumar, M. S. (2014). Quantifying storage changes in regional Great Lakes watersheds using a coupled subsurface-land surface process model and GRACE, MODIS products: *Water Resources Research*, v. 50, no. 9, 7359-7377. <https://doi.org/10.1002/2014WR015589>.
- Ng, G.-H. C., Yourd, A.R., Johnson, N.W., and Myrbo, A.E., 2017, Modeling hydrologic controls on sulfur processes in sulfate-impacted wetland and stream sediments: *Journal of Geophysical Research- Biogeosciences*, v. 122, 2435-2457, <http://dx.doi.org/10.1002/2017JG003822>.
- Ng, G.-H. C., Rosenfeld, C., Santelli, C. M., Yourd, A. R., Lange, J., Duhn, K., and Johnson, N. W., 2020, Microbial and reactive transport modeling evidence for hyporheic flux-driven cryptic sulfur cycling and anaerobic methane oxidation in a sulfate-impacted wetland-stream system: *Journal of Geophysical Research- Biogeosciences*, v. 125, e2019JG005185. <https://doi.org/10.1029/2019JG005185>.
- Persaud, E., Levison, J., MacRitchie, S., Berg, S.J., Erler, A.R., Parker, B., and Sudicky, E., 2020, Integrated modelling to assess climate change impacts on groundwater and surface water in the Great Lakes Basin using diverse climate forcing: *Journal of Hydrology*, v. 584, p. 124682, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124682>.
- Popp, V.R., Brown, S.J., Collins, P., Smith, J.E., and Roy, J.W., 2021, Artificial Sweeteners Identify Spatial Patterns of Historic Landfill Contaminated Groundwater Discharge in an Urban Stream: *Groundwater Monitoring and Remediation*, v. 42, no. 1, p. 50-64, <https://doi.org/10.1111/gwmr.12483>.
- Rakhimbekova, S., O'Carroll, D.M., Anderson, M.S., Wu, M.Z., and Robinson, C.E., 2018, Effect of transient water forcing on the behavior of arsenic in a nearshore aquifer: *Environmental Science and Technology*, v. 52, no. 21, p. 12338-12348, <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03659>.
- Robinson K., Robinson, C.E., Roy J.W., Vissers, M., Almpanis, A., Schneidewind, U., Power, C., 2022, Improved interpretation of groundwater-surface water interactions along a stream reach using 3D high-resolution combined DC resistivity and induced polarization (DC-IP) geoelectrical imaging: *Journal of Hydrology*, V 613, Part B, P. 128468, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128468>.
- Wallace, H., Ji, T., Robinson, C. E., 2020, Hydrogeological controls on heterogeneous groundwater discharge to a large glacial lake: *Journal of Great Lakes Research*. June 2020, Vol. 46 Issue 3, p 476-485, <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.03.006>.
- Xu, S., Frey, S.K., Erler, A.R., Khader, O., Berg, S.J., Hwang, H.T., Callaghan, M.V., Davison, J.H., and Sudicky, E.A., 2021, Investigating groundwater-lake interactions in the

Laurentian Great Lakes with a fully-integrated surface water-groundwater model:
Journal of Hydrology, v. 594, 125911, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125911>.

3 L'INFLUENCE DES CONTAMINANTS DES EAUX SOUTERRAINES SUR LE BASSIN DES GRANDS LACS

James W. Roy¹, Jeffrey Patzke², Sabina Rakhimbekova³

¹ *Environnement et Changement climatique Canada, Burlington, ON, Canada*

² *Ohio Environmental Protection Agency, Columbus, OH, USA*

³ *Université Western, London, ON, Canada*

3.1 Introduction

Ce chapitre est une mise à jour du chapitre 3 (Conant et al., 2016a) du rapport de 2016 de l'annexe sur les eaux souterraines de l'AQEGL (Grannemann et Van Stempvoort, 2016), du même nom. Il présentait un résumé de la science pertinente et disponible concernant l'influence des contaminants des eaux souterraines sur le bassin des Grands Lacs et identifiait les besoins scientifiques futurs sur ce sujet. Les objectifs de cette mise à jour sont i) d'identifier et de décrire toute question nouvelle ou croissante sur ce sujet; ii) de décrire les progrès réalisés en ce qui a trait aux besoins scientifiques décrits au chapitre 3 du rapport de 2016 et; iii) de mettre à jour les besoins scientifiques si nécessaire. L'intention est de mettre en évidence les avancées significatives et pertinentes, ou leur absence, mais pas de se plonger dans les détails des progrès scientifiques incrémentaux. Une description approfondie du sujet et des principales questions relatives aux Grands Lacs a été fournie au chapitre 3 du rapport précédent. C'est pour cette raison que seul bref aperçu du sujet est contenu dans cette courte introduction, ainsi qu'un résumé des principales conclusions du chapitre précédent et des besoins scientifiques prioritaires identifiés (repris ici dans le tableau 3.1).

Similaire au chapitre 3 (Conant et al., 2016a) du rapport précédent, le présent chapitre est axé sur le transport direct des contaminants dans les eaux souterraines vers les milieux humides, les cours d'eau, les rivières et les lacs du bassin des Grands Lacs. Toutefois, il est également question des contaminants présents dans les eaux de surface qui pénètrent dans la subsurface et peuvent ensuite s'y déverser à nouveau, comme dans les zones hyporhéiques, l'emmagasinement dans les berges, la recharge pour les cours d'eau après une inondation par débordement et le mélange au sein des sédiments de la zone de remous pour les lacs. Les contaminants, tels qu'ils sont définis ici, sont des substances indésirables, tant synthétiques que naturelles, qui sont libérées dans les eaux souterraines, ou dans les eaux de surface infiltrées, par des activités humaines ou dont les apports naturels sont renforcés par les activités humaines. Bien que ce ne soit pas un sujet de discussion dans ce chapitre, il est important de noter que les apports d'eaux souterraines non contaminées peuvent réduire les concentrations d'eaux de surface contaminées par dilution, ce qui a un effet positif sur la qualité des eaux de surface du bassin des Grands Lacs.

Les activités humaines, notamment l'agriculture, l'industrie et l'urbanisation, peuvent entraîner la contamination des eaux souterraines. Identifiés dans le rapport de 2016, les groupes de polluants anthropiques communs des eaux souterraines comprenaient des éléments nutritifs, des sels (p. ex. le sel de voirie), des métaux, des hydrocarbures pétroliers et additifs pour carburant, des solvants chlorés et additifs, des radionucléides, des produits pharmaceutiques, d'autres contaminants émergents, ainsi que des pesticides et des microbiotes (y compris des agents pathogènes). L'ensemble des contaminants émergents comprend de nombreux types de produits chimiques, dont beaucoup sont de plus en plus préoccupants et seront examinés plus en détail dans la section 3.2. Les activités humaines peuvent également accroître les concentrations ou le transport de substances toxiques ou dangereuses d'origine naturelle dans les eaux souterraines, comme le méthane, le radon, les saumures, l'arsenic ou le mercure (p. ex. l'exploitation minière, l'assèchement, l'extraction de pétrole et de gaz et l'assainissement des sites contaminés). Certains cas de contamination des eaux souterraines peuvent être confinés à un seul « site » (source ponctuelle), tandis que d'autres sont répartis sur de vastes étendues (source diffuse, comme le sel de voirie, les engrais et les pesticides agricoles). Souvent, divers types ou sources de contamination se chevauchent, ce qui conduit à des mélanges compliqués et se produit plus spécifiquement dans des zones urbaines. Il est important de noter qu'une grande partie de la contamination des eaux souterraines n'est probablement pas détectée ni caractérisée.

Le déversement des eaux souterraines dans les plans d'eau de surface ou les suintements terrestres qui les alimentent peut constituer une voie importante, mais souvent cachée, de charge massive de contaminants dans les eaux de surface du bassin des Grands Lacs. Les zones de déversement des eaux souterraines contaminées seront des zones d'exposition directe à différentes parties d'un écosystème aquatique; la zone endobenthique étant susceptible de connaître les concentrations les plus élevées (non diluées). L'eau de surface peut ensuite transporter les contaminants reçus vers des endroits éloignés (p. ex. en aval), ce qui peut avoir un impact sur d'autres écosystèmes et utilisations de l'eau. Cependant, des mécanismes au sein du système d'écoulement des eaux souterraines, notamment la zone de transition entre les eaux souterraines et les eaux de surface, peuvent agir pour atténuer (retenir, transformer ou éliminer - par exemple - par dégradation, sorption, précipitation de minéraux, absorption par le biote) certains types de contaminants; bien que certains produits de dégradation puissent être relativement plus toxiques que le contaminant d'origine. Nombre de ces mécanismes peuvent également atténuer les contaminants dérivés des eaux de surface qui pénètrent dans la subsurface (p. ex. le mécanisme du « rideau de fer » dans les aquifères littoraux ou le phénomène du « foie de la rivière » dans la zone hyporhéique), améliorant ainsi la qualité de l'eau des flux de retour. Cependant, ces zones peuvent alors agir comme des réserves de certains types de contaminants, avec la menace de rejets futurs.

Le précédent rapport a conclu ce qui suit :

« On ne connaît pas toute l'étendue et toutes les répercussions de l'émergence des eaux souterraines contaminées dans les plans d'eau de surface du bassin des Grands Lacs. On

sait qu'il existe de nombreuses sources de contamination des eaux souterraines dans le bassin et que les eaux souterraines sont une source importante, et souvent majeure, d'eau pour les plans d'eau de surface, et qu'elles ont une importance écologique importante. »

Ce manque de connaissances n'est pas propre au bassin des Grands Lacs. L'identification des zones d'émergence des eaux souterraines vers des eaux de surface n'est pas une tâche simple, et elle est entravée par des méthodes et des ressources limitées. Il est encore plus difficile de caractériser les zones d'émergence d'eaux souterraines contaminées et de quantifier les apports de contaminants dans les eaux de surface, surtout à grande échelle. Bien que l'on comprenne correctement les mécanismes de transport et d'atténuation de nombreux contaminants dans les systèmes d'eaux souterraines, on manque encore de détails sur les voies d'écoulement des eaux souterraines à grande échelle et à l'échelle régionale dans la plupart des régions. En outre, la compréhension scientifique de la dynamique de l'exposition des différentes parties de l'écosystème et de leur sensibilité aux contaminants provenant des eaux souterraines, en particulier pour les organismes benthiques, reste généralement insuffisante, même sans tenir compte des effets confondants d'autres facteurs de stress tels que le régime thermique et les flux/niveaux d'eau, pouvant tous deux être influencés par des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface, l'utilisation des terres et le changement climatique.

En plus de ces conclusions, le chapitre 3 du rapport de 2016 (Conant et al., 2016a; tableau 3.7) a identifié cinq besoins scientifiques prioritaires; ceux-ci sont présentés ici dans le tableau 3.1. Il convient de noter que l'avancement simultané des besoins scientifiques décrits au chapitre 2 (Conant et al., 2016b) est inhérent à ces besoins, car l'amélioration de la compréhension, de la mesure et de la modélisation des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface profitera fortement à l'avancement de la science connexe sur les contaminants des eaux souterraines.

Tableau 3.1 Besoins scientifiques prioritaires liés aux eaux souterraines et aux contaminants listés dans le tableau 3.7 du chapitre 3 (Conant et al., 2016a) du rapport de 2016 (Grannemann et Van Stempvoort, 2016).

Besoins scientifiques prioritaires	Besoins connexes et lacunes dans les renseignements
3A. Méthodes de détection et d'évaluation des émergences d'eau souterraine contaminée	Méthodes et outils d'échantillonnage, de détection et de mesure sur le terrain améliorés et plus économiques. Amélioration de l'évaluation de la variation des contaminants à des petites et grandes échelles spatiales et temporelles. Étalonnage et validation des modèles informatiques pour simuler des processus géochimiques et pour estimer les flux de contaminants.
3B. Évaluation du potentiel de décontamination de la zone de transition	<ul style="list-style-type: none"> ● Compréhension des mécanismes d'atténuation (assainissement) d'une grande variété de contaminants des eaux souterraines, en particulier les nouveaux contaminants, dans la zone de transition. ● Compréhension de la manière dont les conditions géologiques du site et d'échange entre les eaux souterraines et les eaux de surface influent sur ces mécanismes d'atténuation.

3C. Sensibilité des organismes de la zone de transition aux contaminants	Établissement de critères de qualité de l'eau appropriés pour la grande variété de contaminants des eaux souterraines pour lesquels il n'existe toujours pas de recommandations ou de normes, y compris les nouveaux contaminants. Évaluation de l'applicabilité des recommandations en vigueur relatives à la vie aquatique (USEPA, 2015; CCME, 2015) pour les organismes exposés aux eaux souterraines contaminées dans la zone de transition. Renseignements permettant d'indiquer comment évaluer les effets synergiques possibles des multiples contaminants dans la zone de transition.
3D. Répercussions écologiques réelles des contaminants des eaux souterraines	Élaboration de nouveaux essais de toxicité <i>in situ</i> qui mesurent les effets écotoxicologiques des eaux souterraines contaminées, en particulier dans la zone de transition. Intégration des études écotoxicologiques et hydrologiques pour déterminer les réponses des organismes aquatiques aux contaminants dans des conditions d'échange entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Analyse des répercussions de la détérioration de l'écosystème plus grand d'organismes ou des changements dans le comportement provoqués par l'émergence des contaminants des eaux souterraines. Évaluation des coûts et des avantages écologiques liés à l'utilisation de la zone de transition aux fins de décontamination du panache <i>in situ</i> .
3E. Charge de contaminants à l'échelle régionale dans les eaux des Grands Lacs	Détermination des méthodes pour porter et lier les effets à l'échelle du site des contaminants des eaux souterraines émergentes à l'échelle régionale (en particulier les effets de la zone de transition). Obtention de renseignements détaillés concernant les principaux systèmes d'écoulement des eaux souterraines qui émergent dans les eaux de surface dans de nombreux endroits du bassin des Grands Lacs. Création de bases de données détaillées et coordonnées concernant les sources de contaminants des eaux souterraines à l'échelle régionale (p. ex. base de données fondée sur le SIG) dans le bassin des Grands Lacs. Mise au point de modèles sophistiqués capables de lier ces deux ensembles de renseignements, qui tiennent compte de l'écoulement des eaux souterraines élargi ainsi que des processus de transport et de devenir des contaminants, pour la grande variété de contaminants et les processus d'échange entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

Une question pertinente est de savoir si ce chapitre axé sur les contaminants aurait été sensiblement différent si le rapport de 2016 (Conant et al., 2016a) avait été rédigé aujourd'hui plutôt qu'il y a environ 5-6 ans. La réponse n'est « pas autant qu'on puisse penser ». Le rapport précédent était très complet et aucun problème majeur n'a été oublié. Cependant, l'importance ou les préoccupations concernant certains contaminants se sont accrues entre-temps, notamment les substances perfluoroalkyliques et polyfluoroalkyliques (SPFA), comme cela sera abordé à la section 3.2. Bien que des progrès aient été réalisés, il n'y a pas eu d'avancées majeures dans notre compréhension des problèmes liés aux contaminants des eaux souterraines ayant un impact sur le bassin des Grands Lacs, ni dans les outils qui leur sont appliqués et les besoins scientifiques associés à ce sujet, au cours des cinq dernières années (sauf pour les SPFA).

Les raisons de cette situation sont multiples. Dans certains domaines, peu de recherches sont effectuées, en particulier dans ceux nécessitant une équipe interdisciplinaire (p. ex. hydrogéologues et écotoxicologues). Ces recherches sont difficiles et ont souvent moins de possibilités de financement. Certains de ces besoins scientifiques nécessitent des avancées dans d'autres domaines avant que des progrès majeurs puissent être réalisés (p. ex. dans le développement d'outils ou de modèles pour caractériser les schémas

d'émergence des eaux souterraines vers les plans d'eau de surface à une échelle régionale). La recherche progresse le plus souvent de manière incrémentale, en comblant des lacunes mineures dans les connaissances ou en améliorant la quantification de processus compris de manière qualitative. Il s'agit d'avancées nécessaires et importantes, mais elles se situent généralement à un niveau de détail plus fin que celui visé dans le rapport sur l'état des connaissances scientifiques de 2016 (Grannemann et Van Stempvoort, 2016).

3.2 Préoccupations nouvelles ou croissantes concernant les contaminants:

Neuf types clés de contaminants des eaux souterraines ont été énumérés et décrits dans le tableau 3.1 du rapport de 2016 (Conant et al., 2016a). Il s'agit des sels, des éléments nutritifs, des métaux et des métalloïdes, des hydrocarbures pétroliers et des additifs pour carburant, des solvants chlorés et des additifs industriels, des produits pharmaceutiques et autres produits chimiques domestiques, des radionucléides, des pesticides et des agents pathogènes. Le tableau 3.4 donne une répartition supplémentaire pour les contaminants de préoccupation émergente (CPE). Ces regroupements restent en grande partie inchangés. Un changement majeur est l'importance du groupe de produits chimiques SPFA (comprenant le sulfonate de perfluorooctane (SPFO) et l'acide perfluorooctanoïque (APFO)) en tant que contaminants des eaux souterraines (Murray et Salim, 2019) et les efforts scientifiques et de collecte de données déployés récemment pour faire face à cette menace potentielle de contaminants. La question croissante des SPFA sera abordée en détail directement dans la sous-section suivante, à la fois pour expliquer l'enjeu entourant cette classe de composés et pour illustrer la rapidité avec laquelle des mesures peuvent être prises pour développer la science et les données sur d'importants problèmes de contaminants des eaux souterraines comme celui-ci.

D'autres contaminants nouveaux ou gagnant en importance seront brièvement abordés dans la sous-section 3.2.2. Certains de ces contaminants émergents, ou nouveaux contaminants à identifier, deviendront une préoccupation sérieuse pour les impacts des eaux souterraines sur les eaux de surface des Grands Lacs. Cela souligne l'importance 1) de la poursuite des recherches, même si elles sont perçues comme étant progressives à ce moment-là, et 2) de la nécessité de fixer des objectifs scientifiques - comme le présent document - pour guider et cibler les travaux.

3.2.1 Substances perfluoroalkyliques et polyfluoroalkyliques (SPFA)

Les SPFA, communément appelés « produits chimiques éternels » parce que beaucoup de ces composés ne se décomposent pas facilement dans l'environnement, sont des CPE faisant l'objet d'une attention croissante en raison de leur présence répandue et de leurs effets potentiels sur la santé humaine et l'écologie à de très faibles concentrations. Les SPFA sont un grand groupe de composés organiques synthétiques (> 5000) qui contiennent au moins un atome de carbone méthyle ou méthylène entièrement fluoré sans aucun atome H/Cl/Br/I attaché à celui-ci (OCDE, 2021). Bon nombre des SPFA les plus connues ont une chaîne de carbones fluorés. Il existe également une multitude de composés « précurseurs »

(dont certains sont également des SPFA) qui peuvent se dégrader ou se transformer dans l'environnement en diverses SPFA persistantes. Les SPFA ont été mises sur le marché pour la première fois dans les années 1950 (Buck et al., 2011). Résistantes à la chaleur, à l'eau et à l'huile, elles ont eu une multitude d'utilisations au cours du dernier demi-siècle dans des applications industrielles, dans la fabrication de produits de consommation (p. ex. vêtements et textiles hydrofuges et antitaches, ustensiles de cuisine antiadhésifs, produits de nettoyage, produits de soins personnels et matériaux de construction) et dans les mousses utilisées pour combattre les incendies de carburant. Les SPFA ont été trouvées dans toutes les composantes de l'environnement, du sol, de l'eau et de l'air, poissons, faune et humains, y compris dans l'Arctique (Murray et Salim, 2019). Bon nombre des SPFA sont persistantes, bioaccumulables et toxiques, ce qui a suscité des inquiétudes en matière d'écologie et de santé humaine, avec des restrictions récentes sur certaines; principalement à longue chaîne entièrement fluorés (Sunderland et al., 2018 et références). Cependant, les restrictions concernant l'utilisation des SPFA à longue chaîne ont conduit à une plus grande utilisation des SPFA à courte chaîne (Dauchy, 2019), qui ont tendance à être plus mobiles dans les eaux souterraines et peuvent donc migrer sur de plus grandes distances. Il a récemment été suggéré de gérer les SPFA à courte chaîne comme une classe ou des groupes, plutôt que comme des composés individuels (p. ex. Blum et al., 2015). Il existe encore beaucoup d'incertitudes quant aux risques pour la santé humaine et écologique associés à ce groupe diversifié de produits chimiques (Sunderland et al., 2018).

Bien que des recherches scientifiques substantielles sur certaines SPFA dans l'environnement aient eu lieu durant la première décennie des années 2000, ces substances n'ont fait l'objet d'une attention scientifique substantielle qu'au cours de la dernière décennie en tant que contaminants dans les eaux souterraines (seulement pour quelques études, p. ex. Moody et al., 2002). Seuls deux des SPFA les plus produites, étudiées et détectées, à savoir le SPFO et l'APFO, figuraient sur la liste des contaminants nouvellement préoccupants du rapport de 2016 (tableau 3.4; Conant et al., 2016a); tous deux ont également été désignés comme produits chimiques d'intérêt mutuel en vertu de l'annexe 3 de l'AQEGL et figurent sur la liste des polluants organiques persistants de la Convention de Stockholm. Le nombre de SPFO et de leurs précurseurs étudiés a augmenté depuis. Les principales sources de contamination des eaux souterraines par les SPFO identifiées à ce jour comprennent : i) des installations industrielles qui ont produit (pas au Canada), traité ou utilisé des SPFO, ii) des endroits où des mousses extinctrices contenant des SPFO ont été entreposées ou utilisées, iii) des installations de gestion des déchets solides (p. ex. les sites d'enfouissement) et iv) des lieux de traitement et d'élimination des eaux usées et des infrastructures connexes (ITRCweb.org, mis à jour en septembre 2020).

Plus particulièrement, au cours des cinq dernières années, des progrès importants ont été réalisés dans l'identification d'autres sources potentielles de contamination des eaux souterraines par les SPFO, notamment des sources ponctuelles plus abondantes (p. ex. les fosses septiques; Schaidler et al., 2016) et également des sources diffuses (rejets atmosphériques) (p. ex. Brandsma et al., 2019; Schroeder et al., 2021). D'autres sources potentielles diffuses doivent être étudiées, comme l'application de boues d'épuration

(biosolides) sur les champs agricoles et d'autres terres; très répandue dans le bassin des Grands Lacs.

Le principal facteur qui pousse à étudier la contamination des eaux souterraines par les SPFA est l'inquiétude pour la santé humaine; l'accent étant mis sur l'eau potable provenant des puits (p. ex, Hu et al., 2016 ; Guelfo et Adamson, 2018; Kleywegt et al., 2020). Cependant, il y a une augmentation de la reconnaissance des eaux souterraines comme voie de contamination des eaux de surface par les SPFA, et potentiellement nuisible aux écosystèmes aquatiques. Par exemple, Ruyle et al. (2021) ont conclu de leur étude des bassins versants de Cape Cod au Massachusetts (en dehors du bassin des Grands Lacs) que « les SPFA héritées dans les eaux souterraines qui se déplacent lentement constituent une source importante pour l'environnement côtier en aval, représentant un décalage substantiel entre les rejets de SPFA environnementales et les apports aux écosystèmes marins ». Des cas d'eaux souterraines contaminées par des SPFA affectant les eaux de surface du bassin des Grands Lacs ont également été identifiés (Moody et al., 2002; Awad et al., 2011 ; de Sola et al., 2012; Schwichtenberg et al., 2020; Propp et al., 2021).

Des avancées significatives ont également été réalisées récemment dans la compréhension du devenir et du transport des SPFA dans la subsurface (voir l'examen de Hatton et al., 2018), comme la rétention particulièrement forte dans la zone vadose (au-dessus de la nappe phréatique) (p. ex, Sharifan et al., 2021) et dans des stratégies potentielles de remédiation des eaux souterraines (Xu et al., 2021). Des rapports sur des panaches de SPFA s'étendant sur plusieurs kilomètres ont été faits (p. ex. Weber et al., 2017), illustrant la persistance et la mobilité de certains composés SPFA dans les systèmes d'eaux souterraines. Cependant, il y a également eu quelques indications de biotransformation de ces SPFA jugées « récalcitrantes » (p. ex. Huang et Jaffé, 2019; O'Carroll et al., 2020), bien que cette voie d'investigation n'en soit qu'à ses débuts. Les chercheurs s'intéressent maintenant aussi à différents types de SPFA, comme celles à chaîne très courte (Björnsdotter et al., 2019) et les composés de remplacement tels que Gen-X (Brandsma et al., 2019), ainsi qu'aux mesures analytiques des SPFA totales dans un échantillon (voir l'examen de Nakayama et al., 2019).

Le nombre de sites contaminés par des SPFA dans le bassin des Grands Lacs est inconnu. Toute estimation dépend de la mesure dans laquelle les États/provinces ont enquêté sur la contamination par les SPFA ou sur les types d'activités susceptibles d'entraîner une contamination par les SPFA, mais aussi de la définition d'un « site ». Comme l'a fait remarquer Simon (2020), l'application de normes « faibles » en matière d'eau potable et d'eau souterraine pour les SPFA (parties par trillion) conduit potentiellement à un plus grand nombre de « sites ». Les agences étatiques/provinciales et fédérales prennent des mesures pour identifier les sites d'eaux souterraines contaminés par des SPFA; bien que ces mesures ne visent qu'un petit sous-ensemble des SPFA les plus couramment analysées (p. ex. le SPFO, l'APFO). Ces mesures diffèrent d'une juridiction à l'autre, mais peuvent inclure l'échantillonnage et la surveillance de l'eau potable, des sols et des eaux souterraines; des enquêtes sur les entités qui gèrent potentiellement des SPFA (y compris les bases

militaires); et divers moyens réglementaires (p. ex. déclaration des rejets toxiques, déclaration des déchets dangereux, déclaration de l'utilisation des mousses SPFA, etc.).

3.2.2 Autres contaminants d'intérêt croissant

Au cours des cinq dernières années, plusieurs autres contaminants présents dans les eaux souterraines ont fait l'objet d'un intérêt scientifique nouveau ou croissant. Il s'agit notamment des phytoestrogènes. Il s'agit de composés issus des cultures agricoles (Thomson et al., 2020) qui ne figuraient pas parmi les contaminants émergents dans le chapitre de 2016 (Conant et al., 2016a). La présence dans les eaux souterraines du groupe de pesticides plus récents appelés « néonicotinoïdes » a également suscité une attention scientifique récente (Wisconsin - Bradford et al., 2018; Ontario - Browne et al., 2020). Un seul composé des esters organophosphorés (EOP) était mentionné dans le chapitre de 2016. Cependant, ces derniers temps, les EOP ont suscité un intérêt plus large en tant que groupe de contaminants émergents affectant les eaux souterraines en raison de la contamination par des eaux usées septiques (Schaidler et al., 2016) et des décharges (Propp et al., 2021). L'incidence des bactéries résistantes aux antimicrobiens dans les systèmes d'eaux souterraines a également été soulignée récemment comme préoccupation majeure nécessitant beaucoup de recherches supplémentaires (Andrade et al., 2020). Actuellement, il semble qu'il n'y ait pas d'études publiées sur le transport du virus SRAS-CoV-2 (cause de la COVID-19) dans les systèmes d'eaux souterraines.

En conclusion, il convient de noter l'intérêt scientifique substantiel et toujours croissant pour les microplastiques et leur charge de contaminants adsorbés. Cela étant dit, le transport substantiel à travers les systèmes d'eaux souterraines est susceptible d'être important pour les aquifères karstiques et hautement fracturés de manière prédominante, mais peut également se produire pour le karst urbain. Panno et al. (2019) ont signalé la présence de microplastique (en grande partie des fibres) dans les systèmes d'eaux souterraines karstiques de l'ouest et du sud de l'Illinois, aux États-Unis (en dehors du bassin des Grands Lacs); d'autres traceurs suggérant une source d'eaux usées septiques. En outre, la rétention potentiellement temporaire des microplastiques, résultant de la filtration des sédiments associée aux interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface, peut être importante pour leur devenir et leur transport à long terme dans les systèmes d'eaux de surface (p. ex. Drummond et al., 2020).

Tableau 3.2 Mesures prises par les États, les provinces et le gouvernement fédéral pour identifier et documenter la contamination des eaux souterraines par les SPFA et leurs sources.

Mesures permettant d'identifier les sources		CAN	ON	É.-U.	MI	MN	WI	NY	PA	OH	IN	IL
Inventaire	Base de données sur les lieux de contamination connue ou potentielle					✓	✓		✓			
	Enquêtes sur la gestion des produits chimiques						✓	✓	✓			
Échantillonnage	Échantillonnage à l'échelle de l'État/de la province dans les réseaux publics d'approvisionnement en eau				✓	✓	✓			✓	✓	✓
	Échantillonnage ciblé dans les réseaux publics d'approvisionnement en eau		✓					✓	✓			
	Surveillance des contaminants non réglementés			✓		✓						
	Surveillance des sols et des eaux souterraines			✓		✓	✓					
	Échantillonnage de l'eau potable dans les bases militaires ou à proximité								✓	✓	✓	
	Surveillance du sol et de l'eau à proximité des sites pour lesquels l'impact est connu		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		
	Échantillonnage de l'affluent, de l'effluent et des boues dans les stations de traitement des eaux usées					✓	✓					
Réglementation	Inventaire des rejets toxiques			✓								
	Réglementation en tant que substances dangereuses			✓				✓				
	Échantillonnage des eaux souterraines et des lixiviats dans les décharges actives/inactives					✓	✓	✓	✓			

3.3 Recherches spécifiques au bassin des Grands Lacs

Dans le tableau 3.5 du rapport de 2016 (Conant et al., 2016a), des articles scientifiques publiés sur les observations de terrain de l'émergence d'eaux souterraines contaminées vers les eaux de surface dans le bassin des Grands Lacs ont été énumérés. Cette liste, visant à saisir tous les articles pertinents mais qui peut en avoir oublié certains, a donné un aperçu de la quantité de travaux scientifiques réalisés sur ce sujet dans l'ensemble et des contaminants ou des sources qui ont reçu la plus grande attention. Le tableau 3.3 ci-dessous fait le point sur les articles publiés depuis 2015. Il montre que l'accent est fortement mis sur les éléments nutritifs et, de manière connexe, sur les eaux usées, qui

occupent ici une place beaucoup plus importante que dans le rapport de 2016. Cela reflète probablement les préoccupations majeures concernant les éléments nutritifs et les problèmes d'eutrophisation et de prolifération d'algues nuisibles qui en résultent et qui menacent les Grands Lacs (abordés plus en détail au chapitre 4). Au cours des dernières années, le sel de voirie était un sujet important mais a reçu beaucoup moins d'attention récemment; bien que le problème persiste et ne soit pas entièrement compris. La question de l'accumulation et du rejet d'arsenic sur les rives des lacs est un nouveau domaine d'exploration. Il est peut-être surprenant de constater que cette liste contient peu d'articles sur les contaminants suscitant de nouvelles préoccupations, notamment les SPFA.

Bon nombre d'études du tableau 3.3 sont axées sur l'identification d'une préoccupation générale ou sur la compréhension des processus sous-jacents; les travaux étant situés dans le bassin des Grands Lacs simplement pour des raisons de commodité (à proximité d'une université ou d'un institut de recherche). Néanmoins, bon nombre d'entre eux sont tout à fait pertinents pour le bassin des Grands Lacs, car les conditions climatiques et géologiques sont manifestement applicables. Cependant, peu d'études visent à recueillir ou à produire des données spécifiques au bassin des Grands Lacs (ou même à ses principaux sous-bassins), comme le calcul des charges globales de contaminants provenant des eaux souterraines ou l'identification des dégradations générales de régions spécifiques. Certaines études peuvent mener à cela, comme pour le développement d'un modèle régional basé sur le SIG pour prédire les charges de d'éléments nutritifs dans les cours d'eau de l'Ontario provenant des systèmes septiques (p. ex. Oldfield et al., 2020a). Par ailleurs, certaines collectes de données à plus grande échelle peuvent être effectuées par des organismes fédéraux et provinciaux/étatiques et ne pas être publiées dans des revues scientifiques.

En outre, le chapitre 3 du rapport de 2016 (Conant et al., 2016a) traitait également des liens potentiels entre les eaux souterraines et les secteurs préoccupants (SP) des Grands Lacs. Dans l'intervalle, seulement 6 sites aux États-Unis et 1 site au Canada ont indiqué des dépenses pour l'assainissement de sites de déchets dangereux, de friches industrielles et d'eaux souterraines contaminées (mais sans répartition quant au travail effectué pour l'assainissement des contaminants des eaux souterraines) (Hartig et al., 2020).

Tous les besoins scientifiques prioritaires n'exigent pas que les recherches soient effectuées dans le bassin des Grands Lacs pour être applicables à la compréhension ou aux prévisions des impacts des contaminants des eaux souterraines sur les eaux de surface du bassin des Grands Lacs. Cependant, de telles études seraient très pertinentes. De plus, certains des besoins scientifiques prioritaires exigent des activités scientifiques spécifiques au bassin des Grands Lacs.

Tableau 3.3 Études publiées dans la littérature scientifique revue par des pairs portant sur les observations de terrain de l'émergence d'eaux souterraines contaminées vers les eaux de surface dans le bassin des Grands Lacs.

Contaminants	Étude	Eaux/zones réceptrices
Arsenic	Rakhimbekova et al., 2018 Rakhimbekova et al., 2021a	Rives du lac Érié, du lac Huron et du lac Ontario (Ontario)
Bactéries fécales (accumulation dans la zone de rejet de rive)	Wu et al., 2017 Vogel et al., 2016	Rives du lac Ontario et du lac Huron
Chlorure (sel de voirie)	Roy, 2019	Divers cours d'eau et rives de lacs en Ontario
Émergences (y compris les CPC)	Propp et al., 2021	Divers cours d'eau, étangs, terres humides et rives de lacs de l'Ontario
Éléments nutritifs	Maavara et al., 2018	Partie de la rivière Grand (bassin du lac Érié)
	Rixon et al., 2020, Mackie et al., 2021	Bassin du lac Huron (Ontario)
	Cassilas-Ituarte et al., 2019	Bassin du lac Érié (Ohio)
	Knights et al., 2017	
Systèmes septiques (largement axés sur les éléments nutritifs)	Baer et al., 2019	Littoral américain des Grands Lacs
	Oldfield et al., 2020b	Bassin du lac Érié (Ontario)
	Roy et al., 2017	Baie Georgienne (Lac Huron, Ontario)
	Spoelstra et al., 2017, 2020	Bassins du lac Érié et de la baie Georgienne (Ontario)
	Rakhimbekova et al., 2021b	Lac Huron (Ontario)
SPFA	Schwichtenberg et al., 2020	Petit lac dans le Michigan

3.4 Progrès scientifiques concernant les besoins scientifiques de 2016

Cinq besoins scientifiques liés à des lacunes dans les connaissances scientifiques et à des informations insuffisantes, en ce qui concerne la contamination des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs, ont été identifiés dans le rapport de 2016. L'objectif était d'orienter les efforts de surveillance, de recherche et d'autres enquêtes vers des domaines clés qui permettraient d'améliorer la protection de la qualité des eaux des Grands Lacs. Cette section présente une brève évaluation des progrès réalisés pour répondre à ces besoins au cours des cinq dernières années.

3.4.1 Élaboration des méthodes

Le premier besoin scientifique (3A; tableau 3.1) porte sur l'amélioration ou l'élaboration de méthodes de détection et d'évaluation des rejets d'eaux souterraines contaminées. Ce besoin est étroitement lié aux progrès requis dans les techniques de terrain et les modèles numériques pour la détection et l'évaluation des zones de rejet des eaux souterraines (dans le cadre du chapitre 2). Cependant, certaines élaborations spécifiques aux contaminants

ont été réalisées au cours des cinq dernières années. Un exemple est l'élaboration d'une sonde de vitesse ponctuelle dans le lit du cours d'eau et son application aux zones d'émergence de contaminants dans les eaux souterraines (Creameans et al., 2018), qui vise à mieux caractériser la masse de contaminants se déversant dans le lit du cours d'eau. Un autre exemple est la mesure de nouveaux traceurs de contaminants des eaux souterraines dans les eaux de surface pour identifier et quantifier les apports de contaminants, comme l'utilisation d'acésulfame pour tracer les apports d'eaux usées provenant des systèmes septiques (Oldfield et al., 2020b). Plus largement, ce domaine de recherche a connu une tendance continue à utiliser des outils multiples et complémentaires de différents types (p. ex. hydrogéologiques, géophysiques, basés sur la température, géochimiques, traceurs, etc.) pour produire des enquêtes plus complètes.

En lien avec l'élaboration de méthodes, il est nécessaire d'évaluer correctement les sites présentant des problèmes de contaminants potentiels, d'élaborer un ou plusieurs modèles conceptuels appropriés pour la situation à et d'appliquer des méthodes de surveillance ou d'assainissement appropriées pour y remédier. À cette fin, Conant et al. (2019) ont produit un « cadre » pour fournir des conseils sur la contamination impliquant des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface pouvant servir de guide pour appliquer les meilleures méthodes disponibles.

3.4.2 Décontamination de la zone de transition

Les recherches se poursuivent sur le potentiel du devenir, du transport et de l'assainissement de la zone de transition (ou hyporhéique) du cours d'eau (besoin scientifique 3B ; tableau 3.1) pour les contaminants hérités, tels que les nitrates et les solvants chlorés, et avec un certain accent mis sur les contaminants émergents (p. ex. Schaper et al., 2018); généralement plus pour les conditions « suboxiques » et anoxiques. Dans une étude avec des implications plus larges, Harvey et al. (2019) ont récemment introduit le facteur d'importance de réaction et montré que les niveaux intermédiaires de connectivité hyporhéique, plutôt que les niveaux les plus élevés ou les plus bas, sont les plus efficaces pour éliminer l'azote des réseaux fluviaux. En outre, Lewandowski et al. (2019) ont récemment conclu que « bien que la capacité de réduire les charges de nitrates par la restauration hyporhéique dans des tronçons de cours d'eau individuels soit faible, la capacité d'élimination cumulative des nitrates sur des tronçons plus longs ou des réseaux de cours d'eau peut être importante dans des conditions environnementales favorables ». Cependant, la restauration hyporhéique n'est toujours pas explicitement intégrée dans les modèles à grande échelle du devenir des contaminants dans les rivières (Lewandowski et al., 2019). De même pour les lacs, les études continuent d'explorer le mélange hydrologique et les changements géochimiques associés à la circulation de la zone de remous littorale (p. ex. Malott et al., 2016, 2017) et de démontrer la capacité de cette zone à atténuer les contaminants, tels que la microcystine; une toxine produite par les efflorescences algales (Danner et al., 2018). Parallèlement à ces investigations sur les processus, les chercheurs continuent également à travailler sur la conception de structures et de méthodes pour améliorer le potentiel de décontamination de ces zones, bien que des recherches

supplémentaires soient nécessaires, notamment en ce qui concerne la rétention des microplastiques (Lewandowski et al., 2019).

3.4.3 Organismes vulnérables

Peu de recherches ont été publiées sur la façon de mieux comprendre la sensibilité des organismes face aux contaminants toxiques dans les eaux souterraines (besoin scientifique 3C, tableau 3.1), ce qui est particulièrement nécessaire pour ceux qui vivent dans les sédiments (zone endobenthique, zone hyporhéique), car ces zones connaissent généralement les plus grandes concentrations avec des concentrations d'oxygène dissous plus faibles. On sait encore peu de choses sur les espèces, ou les stades de vie qui sont les plus menacés, et sur les types de contaminants. Il s'agit d'une information importante pour guider l'application des directives sur la qualité de l'eau et pour effectuer l'évaluation et la surveillance des sites où les eaux souterraines contaminées émergent dans les eaux de surface. Toutefois, les apports d'éléments nutritifs par les eaux souterraines sur les plantes aquatiques et le périphyton (algues et autres microbes se développant sur les plantes et le fond des sédiments) et l'équilibre concurrentiel entre les deux dans les zones littorales, par le biais des effets d'ombrage, ont été davantage reconnus et évalués (par exemple, Périllon et Hilt, 2016, 2019).

3.4.4 Documenter les effets écologiques

Très peu de recherches ont été faites sur la démonstration et l'évaluation des répercussions écologiques réelles des contaminants provenant des eaux souterraines qui émergent dans les eaux de surface (besoin scientifique 3D, tableau 3.1). Les recherches centrées sur les eaux souterraines tendent à se limiter à l'illustration et à la quantification de l'émergence massive de contaminants, et éventuellement à l'évaluation des concentrations d'exposition potentielles pour les écosystèmes aquatiques. Les travaux axés sur l'écotoxicologie tendent à se limiter à des évaluations en laboratoire de la toxicité des contaminants, principalement à partir de sources (p. ex. lixiviat de décharge) plutôt que l'émergence d'eaux souterraines. Une étude récente (Roy et al., 2017) a démontré certaines dégradations subtiles potentielles de la communauté endobenthique associées à des panaches d'eaux souterraines chevauchants de pétrole et de solvants chlorés se déversant dans une rivière de l'est du Canada. Des facteurs de confusion ont compliqué l'évaluation d'un seul instantané. De même, Sonne et al. (2018) ont signalé un nombre inférieur d'organismes méiobenthiques dans les zones d'émergence d'eaux souterraines touchées par des contaminants organiques, potentiellement lié à une libération accrue de fer et d'arsenic. Là encore, des facteurs de confusion ainsi que des sites d'échantillonnage limités ont empêché l'établissement de liens définitifs. Les deux groupes d'auteurs ont souligné la nécessité de développer des méthodologies de terrain améliorées combinant les mesures des eaux souterraines et des écosystèmes pour cibler correctement cette condition d'exposition largement inexplorée.

3.4.5 Charge de contaminants à l'échelle régionale

En ce qui concerne le besoin scientifique 3E (tableau 3.1), la quantification de la charge de contaminants à l'échelle régionale via les eaux souterraines est une cible intéressante pour certains contaminants (p. ex. le sel de voirie, les éléments nutritifs, les contaminants émergents récalcitrants comme les SPFA), afin de fournir un aperçu plus large des effets des sources à grande échelle et du rôle relatif de la voie des eaux souterraines. Un exemple de cette démarche au cours des cinq dernières années est l'approche du bilan hydrique utilisée par Knights et al. (2017) pour identifier les zones le long de l'ensemble du littoral américain des Grands Lacs qui sont vulnérables aux charges élevées d'éléments nutritifs d'origine souterraine. Un calcul des charges réelles des éléments nutritifs n'a pas été tenté. Cela nécessite de nombreux progrès scientifiques et méthodologiques pour relier les données appropriées sur les sources de contaminants et les modèles hydrologiques sophistiqués qui tiennent compte de l'écoulement physique et des processus de transport et de devenir des contaminants (y compris dans les zones de transition). Aucun exemple spécifique de ce type de travail ciblant le bassin des Grands Lacs n'a été trouvé au cours des cinq dernières années. Il serait également utile d'effectuer une étude comparative entre les enquêtes sur les eaux souterraines à l'échelle régionale par le biais de réseaux de puits de surveillance et les eaux souterraines émergeant dans les eaux de surface afin de mieux déterminer quels ensembles de données sont les plus pertinents pour calibrer et valider cette approche de modélisation.

Même si le chapitre de 2016 (Conant et al., 2016a) ne met pas l'accent sur ce point, il semble également nécessaire, et peut-être plus réalisable, de fournir des estimations semi-quantitatives de la charge et d'identifier les zones présentant une plus grande concentration ou un impact potentiel de l'émergence directe de contaminants dans les eaux souterraines pour une plus grande variété de contaminants clés. Cela peut encore permettre d'identifier et de prédire les impacts des contaminants des eaux souterraines (c'est-à-dire où, quand et combien) sur la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes, et pourrait être plus applicable pour les contaminants qui réagissent dans l'environnement des eaux de surface (p. ex. les éléments nutritifs, les métaux, les radionucléides, les contaminants organiques dégradables).

Un élément clé de ce besoin scientifique est l'identification des sources de contamination des eaux souterraines. Bien que les emplacements des sources et des sites de contamination des eaux souterraines confirmés et potentiels soient souvent connus, ils ne sont pas actuellement facilement consolidés à partir de la myriade de dépôts de données entreposant cette information. Une exception récente est celle des sources de SPFA dont il a été question ci-dessus; la plupart des États/provinces du bassin des Grands Lacs compilant actuellement les informations sur l'emplacement des principaux sites de sources ponctuelles (tableau 3.2) dans un délai relativement court. Cela démontre qu'avec un effort concerté, de telles compilations pourraient être complétées pour d'autres contaminants prioritaires des eaux souterraines, bien qu'avec une plus grande incertitude pour ceux qui ont des apports non ponctuels importants (p. ex. le sel de voirie, les éléments nutritifs) ou de petites sources ponctuelles étendues (p. ex. les systèmes septiques).

Cependant, dans ces cas, les modèles d'entrée généralisés basés sur le SIG peuvent être suffisants pour répondre aux questions pertinentes et fournir des estimations semi-quantitatives de la charge à grande échelle. Par exemple, Oldfield et al. (2020a) ont appliqué un outil SIG pour estimer une fourchette supérieure d'apports d'éléments nutritifs (N et P) provenant de systèmes septiques dans le bassin du lac Érié en Ontario.

3.5 Mise à jour des besoins scientifiques prioritaires

Les cinq besoins scientifiques prioritaires définis dans le rapport de 2016 (tableau 3.1) sont tout aussi importants et pertinents qu'il y a cinq ans. Il ne semble pas y avoir de lacune majeure ou de problème nouvellement développé nécessitant un besoin scientifique supplémentaire. Cela étant dit, il est important de continuer à se concentrer sur les contaminants nouvellement émergents (comme les SPFA) et faire preuve d'une diligence constante dans la recherche de nouvelles menaces de contamination des eaux souterraines. En outre, les changements dans l'environnement naturel et construit qui pourraient avoir une répercussion sur la contamination des eaux souterraines, ainsi que sur leur transport et leur émergence dans les plans, d'eau de surface, doivent être pris en compte dans la planification des études de surveillance et de recherche. Ces changements peuvent résulter de modifications des pratiques agricoles (meilleures pratiques de gestion), de l'urbanisation (y compris une plus grande mise en œuvre du développement à faible impact, qui favorise la recharge des eaux souterraines par rapport au ruissellement de surface), de la restauration des milieux humides et du changement climatique. Nombre de ces facteurs sont examinés plus en détail dans les chapitres suivants. Il convient de souligner que les futures études devraient porter sur l'ensemble des récepteurs, y compris les rives des lacs, les milieux humides et les zones riveraines, et pas seulement sur les cours d'eau.

L'une des conclusions du chapitre 3 du rapport de 2016 (Conant et al., 2016a) était que : « Une grande partie de ce travail nécessite des équipes intégrées d'écotoxicologues et de scientifiques spécialisés dans les eaux souterraines, travaillant idéalement sur des sites de recherche de terrain ciblés en utilisant une approche à long terme, holistique, complète et intensive en mesures ». Il semble y avoir peu de preuves que ce type de travail se produise, hormis peut-être pour la recherche sur les répercussions écologiques des éléments nutritifs fournis par les eaux souterraines vers les eaux douces (principalement en Europe; p. ex. Périllon et al., 2017; Périllon et Hilt, 2019, mais pas exclusivement; p. ex. Naranjo et al., 2019). Cette exigence est encore essentielle aujourd'hui, mais doit être encouragée et soutenue pour répondre pleinement aux besoins scientifiques entourant les répercussions des contaminants des eaux souterraines sur les eaux des Grands Lacs.

Références:

Andrade, L., Kelly, M., Hynds, P., Weatherill, J., Majury, A. and O'Dwyer, J., 2020. Groundwater resources as a global reservoir for antimicrobial-resistant bacteria. *Water research*, 170, p.115360.

- Awad, E., Zhang, X., Bhavsar, S.P., Petro, S., Crozier, P.W., Reiner, E.J., Fletcher, R., Tittlemier, S.A., Braekevelt, E., 2011. Long-term environmental fate of perfluorinated compounds after accidental release at Toronto airport. *Environmental Science and Technology* 45, 8081-8089.
- Baer, S., Robertson, W., Spoelstra, J., Schiff, S., 2019. Phosphorus and nitrogen loading to Lake Huron from septic systems at Grand Bend, ON. *Journal of Great Lakes Research* 45, 642-650.
- Björnsdotter, M.K., Yeung, L.W.Y., Kärrman, A., Jogsten, I.E., 2019. Ultra-short-chain perfluoroalkyl acids including trifluoromethane sulfonic acid in water connected to known and suspected point sources in Sweden. *Environmental Science and Technology* 53, 11093-11101.
- Blum A., Balan, S.A., Scheringer, M., Trier, X., Goldenman, G., Cousins, I.T., et al. 2015. The Madrid statement on poly-and perfluoroalkyl substances (PFASs). *Environ Health Perspect.* 123:A107.
- Bradford, B.Z., Huseeth, A.S., Groves, R.L., 2018. Widespread detections of neonicotinoid contaminants in central Wisconsin groundwater. *PLoS One* 13, e0201753.
- Brandsma, S.H., Koekkoek, J.C., van Velzen, M.J.M., de Boer, J., 2019. The PFOA substitute GenX detected in the environment near a fluoropolymer manufacturing plant in the Netherlands. *Chemosphere* 220, 493-500.
- Browne, D., Levison, J., Limay-Rios, V., Novakowski, K., Schaafsma, A., 2020. Neonicotinoids in groundwater: presence and fate in two distinct hydrogeologic settings in Ontario, Canada. *Hydrogeology Journal* 29, 651-666.
- Buck, R.C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J.M., Cousins, I.T., De Voogt, P., Jensen, A.A., Kannan, K., Mabury, S.A., van Leeuwen, S.P.J., 2011. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. *Integrated environmental assessment and management* 7, 513-541.
- Casillas-Ituarte, N.N., Sawyer, A.H., Danner, K.M., King, K.W., Covault, A.J., 2019. Internal Phosphorus Storage in Two Headwater Agricultural Streams in the Lake Erie Basin. *Environmental Science and Technology* 54, 176-183.
- Conant B, Roy JW, Patzke J. 2016a. Influence of groundwater contaminants on the Great Lakes Basin. Chapt. 3 in Grannemann, G. and Van Stempvoort, D. (Eds.), *Groundwater science relevant to the Great Lakes Water Quality Agreement: A status report. Final version, May, 2016. Published (online) by Environment and Climate Change Canada and U.S. Environmental Protection Agency.*

- Conant B, Danielescu S, Reeves H, Coulibaly P. 2016b. Groundwater/surface water interaction. Chapt. 2 in Grannemann, G. and Van Stempvoort, D. (Eds.), Groundwater science relevant to the Great Lakes Water Quality Agreement: A status report. Final version, May, 2016. Published (online) by Environment and Climate Change Canada and U.S. Environmental Protection Agency.
- Conant Jr, B., Robinson, C.E., Hinton, M.J., Russell, H.A., 2019. A framework for conceptualizing groundwater-surface water interactions and identifying potential impacts on water quality, water quantity, and ecosystems. *Journal of Hydrology*, 574, pp.609-627.
- Cremeans, M.M., Devlin, J.F., McKnight, U.S., Bjerg, P.L., 2018. Application of new point measurement device to quantify groundwater-surface water interactions. *Journal of contaminant hydrology* 211, 85-93.
- Danner, K.M., Mave, M.A., Sawyer, A.H., Lee, S., Lee, J., 2018. Removal of the algal toxin microcystin-*LR* in permeable coastal sediments: Physical and numerical models. *Limnology and Oceanography* 63, 1593-1604.
- Dauchy, X., 2019. Per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water: current state of the science. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 7, 8-12.
- De Solla, S.R., De Silva, A.O., Letcher, R.J., 2012. Highly elevated levels of perfluorooctane sulfonate and other perfluorinated acids found in biota and surface water downstream of an international airport, Hamilton, Ontario, Canada. *Environment international* 39, 19-26.
- Drummond, J.D., Nel, H.A., Packman, A.I. Krause, S., 2020. Significance of hyporheic exchange for predicting microplastic fate in rivers. *Environmental Science & Technology Letters*, 7(10), pp.727-732.
- Guelfo, J.L., Adamson, D.T., 2018. Evaluation of a national data set for insights into sources, composition, and concentrations of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in US drinking water. *Environmental Pollution* 236, 505-513.
- Grannemann G, Van Stempvoort D. (Eds.) 2016. Groundwater science relevant to the Great Lakes Water Quality Agreement: A status report. Prepared by the Annex 8 Subcommittee for the Great Lakes Executive Committee, Final version, May, 2016. Published (online) by Environment and Climate Change Canada and U.S. Environmental Protection Agency.
- Hartig, J.H., Krantzberg, G., Alsip, P., 2020. Thirty-five years of restoring Great Lakes Areas of Concern: Gradual progress, hopeful future. *Journal of Great Lakes Research*.

- Harvey, J., Gomez Velez, J., Schmadel, N., Scott, D., Boyer, E., Alexander, R., Eng, K., Golden, H., Kettner, A., Konrad, C., 2019. How hydrologic connectivity regulates water quality in river corridors. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 55, 369-381.
- Hatton, J., Holton, C., DiGiuseppi, B., 2018. Occurrence and behavior of per- and polyfluoroalkyl substances from aqueous film-forming foam in groundwater systems. *Remediation Journal* 28, 89-99.
- Hu, X.C., Andrews, D.Q., Lindstrom, A.B., Bruton, T.A., Schaider, L.A., Grandjean, P., Lohmann, R., Carignan, C.C., Blum, A., Balan, S.A., 2016. Detection of poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in US drinking water linked to industrial sites, military fire training areas, and wastewater treatment plants. *Environmental science and technology letters* 3, 344-350.
- Huang, S., Jaffé, P.R., 2019. Defluorination of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) by *Acidimicrobium* sp. strain A6. *Environmental Science and Technology* 53, 11410-11419.
- Kleywegt, S., Raby, M., McGill, S., Helm, P., 2020. The impact of risk management measures on the concentrations of per- and polyfluoroalkyl substances in source and treated drinking waters in Ontario, Canada. *Science of The Total Environment* 748, 141195.
- Knights, D., Parks, K.C., Sawyer, A.H., David, C.d.H., Browning, T.N., Danner, K.M., Wallace, C.D., 2017. Direct groundwater discharge and vulnerability to hidden nutrient loads along the Great Lakes coast of the United States. *Journal of Hydrology* 554, 331-341.
- Lewandowski, J.r., Arnon, S., Banks, E., Batelaan, O., Betterle, A., Broecker, T., Coll, C., Drummond, J.D., Gaona Garcia, J., Galloway, J., 2019. Is the hyporheic zone relevant beyond the scientific community? *Water* 11, 2230.
- Maavara, T., Slowinski, S., Rezanezhad, F., Van Meter, K., Van Cappellen, P., 2018. The role of groundwater discharge fluxes on Si: P ratios in a major tributary to Lake Erie. *Science of The Total Environment* 622, 814-824.
- Mackie, C., Levison, J., Binns, A., O'Halloran, I., 2021. Groundwater-surface water interactions and agricultural nutrient transport in a Great Lakes clay plain system. *Journal of Great Lakes Research* 47, 145-159.
- Malott, S., O'Carroll, D.M., Robinson, C.E., 2016. Dynamic groundwater flows and geochemistry in a sandy nearshore aquifer over a wave event. *Water Resources Research* 52, 5248-5264.

- Malott, S., O'Carroll, D.M., Robinson, C.E., 2017. Influence of instantaneous and time-averaged groundwater flows induced by waves on the fate of contaminants in a beach aquifer. *Water Resources Research* 53, 7987-8002.
- Moody, C.A., Martin, J.W., Kwan, W.C., Muir, D.C.G., Mabury, S.A., 2002. Monitoring perfluorinated surfactants in biota and surface water samples following an accidental release of fire-fighting foam into Etobicoke Creek. *Environmental Science and Technology* 36, 545-551.
- Murray, M.W., Salim, O. 2019, *The Science and Policy of PFAS in the Great Lakes Region: A Roadmap for Local, State, and Federal Action*. National Wildlife Federation, Great Lakes Regional Center.
- Nakayama, S.F., Yoshikane, M., Onoda, Y., Nishihama, Y., Iwai-Shimada, M., Takagi, M., Kobayashi, Y., Isobe, T., 2019. Worldwide trends in tracing poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) in the environment. *Trends in Analytical Chemistry* 121, 115410.
- Naranjo, R.C., Niswonger, R.G., Smith, D., Rosenberry, D., Chandra, S., 2019. Linkages between hydrology and seasonal variations of nutrients and periphyton in a large oligotrophic subalpine lake. *Journal of Hydrology* 568, 877-890.
- O'Carroll, D.M., Jeffries, T.C., Lee, M.J., Le, S.T., Yeung, A., Wallace, S., Battye, N., Patch, D.J., Manefield, M.J., Weber, K.P., 2020. Developing a roadmap to determine per-and polyfluoroalkyl substances-microbial population interactions. *Science of The Total Environment*, 712, p.135994.
- OECD 2021. *Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance*, OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) Series on Risk Management, No. 61, OECD Publishing, Paris.
- Oldfield, L.E., Roy, J.W., Robinson, C.E., 2020a. Investigating the use of the artificial sweetener acesulfame to evaluate septic system inputs and their nutrient loads to streams at the watershed scale. *Journal of Hydrology* 587, 124918.
- Oldfield, L., Rakhimbekova, S., Roy, J.W., Robinson, C.E., 2020b. Estimation of phosphorus loads from septic systems to tributaries in the Canadian Lake Erie Basin. *Journal of Great Lakes Research* 46, 1559-1569.
- Panno, S.V., Kelly, W.R., Scott, J., Zheng, W., McNeish, R.E., Holm, N., Hoellein, T.J., Baranski, E.L., 2019. Microplastic contamination in karst groundwater systems. *Groundwater*, 57(2), pp.189-196.

- Périllon, C.C., Hilt, S., 2016. Groundwater influence differentially affects periphyton and macrophyte production in lakes. *Hydrobiologia* 778, 91-103.
- Périllon, C.C., Hilt, S., 2019. Groundwater discharge gives periphyton a competitive advantage over macrophytes. *Aquatic Botany* 154, 72-80.
- Périllon, C.C., Pöschke, F., Lewandowski, J.R., Hupfer, M., Hilt, S., 2017. Stimulation of epiphyton growth by lacustrine groundwater discharge to an oligo-mesotrophic hard-water lake. *Freshwater Science* 36, 555-570.
- Propp, V.R., De Silva, A.O., Spencer, C., Brown, S.J., Catingan, S.D., Smith, J.E., Roy, J.W., 2021. Organic contaminants of emerging concern in leachate of historic municipal landfills. *Environmental Pollution* 276, 116474.
- Rakhimbekova, S., O'Carroll, D.M., Andersen, M.S., Wu, M.Z., Robinson, C.E., 2017. Effect of transient wave forcing on the behavior of arsenic in a nearshore aquifer. *Environmental Science and Technology* 52, 12338-12348.
- Rakhimbekova, S., O'Carroll, D.M. and Robinson, C.E., 2021a. Occurrence of Arsenic in Nearshore Aquifers Adjacent to Large Inland Lakes. *Environmental Science and Technology* 55, 12, 8079–8089.
- Rakhimbekova, S., O'Carroll, D.M., Oldfield, L.E., Ptacek, C.J., Robinson, C.E., 2021b. Spatiotemporal controls on septic system derived nutrients in a nearshore aquifer and their discharge to a large lake. *Science of The Total Environment* 752, 141262.
- Rixon, S., Levison, J., Binns, A., Persaud, E., 2020. Spatiotemporal variations of nitrogen and phosphorus in a clay plain hydrological system in the Great Lakes Basin. *Science of The Total Environment* 714, 136328.
- Roy, J.W., 2019. Endobenthic Organisms Exposed to Chronically High Chloride from Groundwater Discharging along Freshwater Urban Streams and Lakeshores. *Environmental Science and Technology* 53, 9389-9397.
- Roy, J.W., Spoelstra, J., Robertson, W.D., Klemm, W., Schiff, S.L., 2017. Contribution of phosphorus to Georgian Bay from groundwater of a coastal beach town with decommissioned septic systems. *Journal of Great Lakes Research* 43, 1016-1029.
- Ruyle, B.J., Pickard, H.M., LeBlanc, D.R., Tokranov, A.K., Thackray, C.P., Hu, X.C., Vecitis, C.D., Sunderland, E.M., 2021. Isolating the AFFF Signature in Coastal Watersheds Using Oxidizable PFAS Precursors and Unexplained Organofluorine. *Environmental Science and Technology* 55, 3686-3695.

- Schaider, L.A., Ackerman, J.M., Rudel, R.A., 2016. Septic systems as sources of organic wastewater compounds in domestic drinking water wells in a shallow sand and gravel aquifer. *Science of The Total Environment* 547, 470-481.
- Schaper, J.L., Posselt, M., McCallum, J.L., Banks, E.W., Hoehne, A., Meinikmann, K., Shanafield, M.A., Batelaan, O., Lewandowski, J., 2018. Hyporheic exchange controls fate of trace organic compounds in an urban stream. *Environmental Science and Technology* 52, 12285-12294.
- Schroeder, T., Bond, D., Foley, J., 2021. PFAS soil and groundwater contamination via industrial airborne emission and land deposition in SW Vermont and Eastern New York State, USA. *Environmental Science: Processes and Impacts* 23, 291-301.
- Schwichtenberg, T., Bogdan, D., Carignan, C.C., Reardon, P., Rewerts, J., Wanzek, T., Field, J.A., 2020. PFAS and Dissolved Organic Carbon Enrichment in Surface Water Foams on a Northern US Freshwater Lake. *Environmental Science and Technology* 54, 14455-14464.
- Sharifan, H., Bagheri, M., Wang, D., Burken, J.G., Higgins, C.P., Liang, Y., Liu, J., Schaefer, C.E., Blotvogel, J., 2021. Fate and transport of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the vadose zone. *Science of The Total Environment*, 145427.
- Simon, J.A., 2020, Editor's Perspective-Just How Large Is the PFAS Problem?, *Remediation*, 2020;30:3-4, Wiley Periodicals.
- Sonne, A.T., Rasmussen, J.J., Höss, S., Traunspurger, W., Bjerg, P.L., McKnight, U.S., 2018. Linking ecological health to co-occurring organic and inorganic chemical stressors in a groundwater-fed stream system. *Science of the total environment*, 642, pp.1153-1162.
- Spoelstra, J., Schiff, S.L., Brown, S.J., 2020. Septic systems contribute artificial sweeteners to streams through groundwater. *Journal of Hydrology X* 7, 100050.
- Spoelstra, J., Senger, N.D., Schiff, S.L., 2017. Artificial sweeteners reveal septic system effluent in rural groundwater. *Journal of environmental quality* 46, 1434-1443.
- Sunderland, E.M., Hu, X.C., Dassuncao, C., Tokranov, A.K., Wagner, C.C., Allen, J.G., 2018. A review of the pathways of human exposure to poly-and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects. *Journal of exposure science and environmental epidemiology* 29, 131-147.
- Thompson, T.J., Briggs, M.A., Phillips, P.J., Blazer, V.S., Smalling, K.L., Kolpin, D.W., Wagner, T., 2020. Groundwater discharges as a source of phytoestrogens and other

agriculturally derived contaminants to streams. *Science of The Total Environment* 755, 142873.

Vogel, L.J., O'Carroll, D.M., Edge, T.A. Robinson, C.E., 2016. Release of *Escherichia coli* from foreshore sand and pore water during intensified wave conditions at a recreational beach. *Environmental science and technology*, 50(11), pp.5676-5684.

Weber, A.K., Barber, L.B., LeBlanc, D.R., Sunderland, E.M. and Vecitis, C.D. 2017. Geochemical and hydrologic factors controlling subsurface transport of poly-and perfluoroalkyl substances, Cape Cod, Massachusetts. *Environmental science and technology*, 51(8), pp.4269-4279.

Wu, M.Z., O'Carroll, D.M., Vogel, L.J., Robinson, C.E., 2017. Effect of low energy waves on the accumulation and transport of fecal indicator bacteria in sand and pore water at freshwater beaches. *Environmental Science and Technology* 51, 2786-2794.

Xu, B., Liu, S., Zhou, J.L., Zheng, C., Weifeng, J., Chen, B., Zhang, T., Qiu, W., 2021. PFAS and Their Substitutes in Groundwater: Occurrence, Transformation and Remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 125159.



Taches caractéristique d'oxyde de fer et de manganèse associées à un suintement d'eau souterraine provenant d'un ancien site d'enfouissement.

Crédit photo: James Roy, Environnement et Changement climatique Canada

4 EAUX SOUTERRAINES ET ÉLÉMENTS NUTRITIFS

John Spoelstra¹, Paul Juckem²,

¹ *Environnement et Changement climatique Canada, Burlington, ON, Canada*

² *U.S. Geological Survey, Madison, WI, USA*

4.1 Introduction

Les éléments nutritifs, notamment l'azote (A) et le phosphore (P), constituent l'une des catégories de contaminants les plus nuisibles pour les Grands Lacs. Bien qu'ils soient essentiels à la croissance de la vie aquatique, les éléments nutritifs, lorsqu'ils sont présents en excès, peuvent avoir des effets néfastes sur la qualité de l'eau en raison de l'eutrophisation, de la toxicité et de la prolifération des algues (Phosphorus Reduction Task Force, 2012). Les problèmes causés par l'excès d'éléments nutritifs ont un impact sur la santé humaine et écologique et nuisent également aux utilisations récréatives des lacs et des cours d'eau dans le bassin des Grands Lacs. Bien que les efforts de gestion déployés au cours des dernières décennies aient permis de réduire la charge en éléments nutritifs des Grands Lacs provenant de certaines sources ponctuelles majeures (p. ex. les effluents d'eaux usées), l'eutrophisation se poursuit (Commission mixte internationale, 2013). En tant que principal facteur limitant la croissance dans les eaux douces, le phosphore est l'élément nutritif le plus préoccupant dans les Grands Lacs (Phosphorus Reduction Task Force, 2012). Toutefois, l'azote influence également la productivité primaire et la prolifération d'algues. Par conséquent, la cogestion des charges d'azote et de phosphore (p. ex. le ratio A:P) pourrait être nécessaire pour réduire l'eutrophisation et, en particulier, la toxicité de la prolifération d'algues nuisibles (Dierkes, 2019, Paerl et al. 2016, Paerl et al. 2020) dans le bassin des Grands Lacs.

Le système d'écoulement des eaux souterraines a été identifié comme une voie de transport relativement mal comprise des éléments nutritifs vers les Grands Lacs, à la fois par des apports directs le long des rives des lacs et indirectement comme une composante majeure de l'écoulement des cours d'eau se déversant dans les Grands Lacs (Grannemann et al. 2000). En outre, l'impact des eaux souterraines sur la dynamique de la prolifération d'algues est complexe et potentiellement sous-estimé (Brookfield et al. 2021). Les éléments nutritifs à base d'azote dans les eaux souterraines sont généralement sous forme de nitrate (NO₃⁻), d'ammonium (NH₄⁺) et d'azote organique dissous (DON; Wang et al. 2018), parmi lesquels le nitrate tend à être dominant et l'élément nutritif le plus mobile des eaux souterraines. Le phosphate (PO₄³⁻) est une forme commune de phosphore dans les eaux souterraines et sa mobilité dépend fortement des conditions redox des eaux souterraines (Domagalski et Johnson, 2011, 2012). Le phosphate est également la forme de phosphore la plus biologiquement disponible, ou réactive. Les principales sources d'excès d'éléments nutritifs dans les eaux souterraines du bassin des Grands Lacs sont les engrais à usage

agricole et non agricole (p. ex. usage domestique, terrains de golf), le fumier animal, les installations septiques, les égouts non étanches, les décharges et certains types de sites industriels (p. ex. fabrication de produits chimiques) (Robinson, 2015). Les zones riveraines, l'interface entre la terre et les eaux de surface, sont des points chauds biogéochimiques et agissent souvent comme des tampons en éliminant les éléments nutritifs, notamment les nitrates, des eaux souterraines avant leur rejet dans les eaux de surface (McClain et al. 2003, Bernhardt et al. 2017).

Le chapitre quatre (Robinson et al. 2016) du rapport de 2016 (Grannemann et Van Stempvoort, 2016) a identifié quatre besoins scientifiques prioritaires liés aux eaux souterraines et aux éléments nutritifs (tableau 4.1).

4.2 Besoins scientifiques prioritaires identifiés dans le rapport de 2016

Tableau 4.1 Besoins scientifiques prioritaires liés aux eaux souterraines et aux éléments nutritifs

Besoins scientifiques prioritaires	Besoins connexes et lacunes en matière d'information
4A. Lien entre la gestion des terres et la charge en éléments nutritifs de l'eau souterraine	<ul style="list-style-type: none"> ● Reconnaître que la charge en éléments nutritifs de l'eau souterraine est liée à la gestion des terres. ● Évaluer les pratiques exemplaires de gestion visant à réduire l'exportation des éléments nutritifs de l'eau souterraine vers les eaux de surface. ● Comprendre le décalage temporel entre la mise en œuvre des pratiques exemplaires de gestion et l'amélioration de la qualité de l'eau souterraine et de l'eau de surface.
4B. Rôle du phénomène des points chauds sur les flux d'éléments nutritifs de l'eau souterraine	<ul style="list-style-type: none"> ● Échantillonner l'eau souterraine afin d'évaluer la variabilité spatiale et temporelle associée au phénomène des points chauds. ● Recherche sur l'importance du phénomène des points chauds relativement à l'émergence directe d'éléments nutritifs de l'eau souterraine dans les Grands Lacs.
4C. Mise à l'échelle des connaissances propres au site	<ul style="list-style-type: none"> ● Élaborer des outils pour porter les connaissances locales sur l'eau souterraine à l'échelle du bassin versant et du bassin. ● Identifier les mesures de contrôle du paysage sur les flux d'éléments nutritifs dans l'eau souterraine. ● Identifier les bassins versants prioritaires où il faut concentrer les efforts de recherche.

4D. Évaluation de l'eau souterraine à l'échelle du bassin	<ul style="list-style-type: none"> ● Compiler les données historiques sur la qualité de l'eau souterraine. ● Améliorer les réseaux de surveillance pour évaluer les tendances relatives aux éléments nutritifs dans l'eau souterraine. ● Réaliser une évaluation systématique régulière des tendances relatives aux éléments nutritifs dans l'eau souterraine dans le bassin des Grands Lacs. ● Augmentation de la disponibilité des produits de cartographie hydrogéologique.
---	--

4.3 Mise à jour de l'état des besoins scientifiques prioritaires

Dans cette section, nous abordons brièvement des exemples de recherches récemment publiées qui répondent aux besoins scientifiques prioritaires identifiés précédemment concernant les éléments nutritifs des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs.

4.3.A. - Lien entre la gestion des terres et la charge en éléments nutritifs de l'eau souterraine

Bien que de nombreux rapports et études scientifiques aient mis en évidence le lien entre les pratiques d'utilisation des terres et la pollution des eaux souterraines par les éléments nutritifs, l'ampleur et le moment de ces activités dans l'apport d'éléments nutritifs aux eaux de surface par les voies souterraines sont souvent mal compris (p. ex. Brookfield et al. 2021). Les pratiques d'utilisation et de gestion des terres agricoles peuvent avoir des effets variables sur la lixiviation des éléments nutritifs vers les aquifères; en fonction des types de cultures, de la fertilisation (quantités, types et moment) et des conditions d'humidité du sol (Conseil des académies canadiennes, 2013). Les études récentes de McDowell et al. (2015), Schilling et al. (2016), Green et al. (2018), Esmaili et al. (2020) et Saleem et al. (2020) ont évalué plusieurs pratiques agricoles afin de déterminer leur effet sur la lixiviation des nitrates et du phosphore dissous. Les résultats ont indiqué que certaines rotations de cultures et pratiques de fertilisation peuvent réduire l'accumulation excessive d'éléments nutritifs dans les sols et réduire la lixiviation vers les aquifères (McDowell et al. 2015). Par exemple, Green et al. (2018) ont reconstitué une charge historique en nitrates dans un bassin versant du lac Michigan et ont trouvé des preuves que les pertes par lixiviation de nitrates provenant des engrais minéraux ont été possiblement divisées par trois environ entre 1945 et 2006, tandis que les pertes par lixiviation provenant du fumier ont été possiblement multipliées par dix environ au cours de cette période.

En ce qui concerne la qualité des eaux souterraine, la quantification de l'efficacité des pratiques exemplaires de gestion (PEG) est complexe en raison de la variabilité des facteurs hydrogéologiques, climatiques et de gestion des terres, et peut bénéficier de la combinaison des analyses de surveillance et de modélisation (Green et al., 2018; Esmaili et al., 2020; Saleem et al., 2020). De plus, les évaluations de l'efficacité des PEG pour

réduire la lixiviation des éléments nutritifs vers les aquifères nécessitent de longues périodes (de plusieurs années à plusieurs décennies) de surveillance pour réduire l'incertitude associée à la variabilité naturelle (McDowell et al., 2015; Esmaili et al., 2020). Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour mieux quantifier la façon dont les pratiques de gestion des terres économiquement exploitables (p. ex. les rotations de cultures, les cultures de couverture, le calendrier des applications d'engrais et de fumier) sont liées aux pertes d'éléments nutritifs par lixiviation (Esmaili et al. 2020, Green et al. 2018), bien que certains États aient déjà tenté de quantifier les améliorations relatives des pertes d'éléments nutritifs attribuables à des PEG spécifiques (Iowa State University, 2019), tandis que d'autres ont élaboré des recommandations généralisées (Felix-Gerth et Rhees, 2021).

Les sources non agricoles d'éléments nutritifs, comme les installations septiques, continuent d'être évaluées pour leur rôle dans la charge en éléments nutritifs dans les cours d'eau et lacs. Les estimations tirées d'études récentes (Roy et al., 2017; Spoelstra et al., 2017; Baer et al., 2019; Hamlin et al., 2020; Oldfield et al., 2020a,b; et Rakhimbekova et al., 2021) suggèrent que les installations septiques représentent une petite composante de la charge totale en éléments nutritifs (jusqu'à 5 % pour le phosphore et de 0 à 2 % pour les nitrates) dans les Grands Lacs et leurs affluents. Cependant, les installations septiques peuvent être des sources importantes d'éléments nutritifs dans les échancrures abritées sans autres apports externes importants (Rakhimbekova et al., 2021). Les apports d'éléments nutritifs provenant des eaux souterraines d'installations septiques peuvent également être plus élevés lorsque les installations septiques fonctionnent mal, sont mal conçues ou mal situées. Des études récentes ont montré que les installations septiques actives et désaffectées contribuent aux éléments nutritifs des Grands Lacs et que l'ampleur de cette source est susceptible d'augmenter à l'avenir en raison de la lenteur du temps de parcours des eaux souterraines, de la sursaturation des sols en phosphore et de l'augmentation des pertes par lixiviation si la performance des installations septiques diminue en raison d'un mauvais entretien (Roy et al., 2017; Spoelstra et al. 2017; Baer et al. 2019; Oldfield et al., 2020a,b; Rakhimbekova et al., 2021).

Plusieurs études récentes (p. ex. Roy et al., 2017; Green et al., 2018; Casillas-Ituarte et al., 2020; Esmaili et al., 2020; Johnson et Stets, 2020; Oldfield et al., 2020b; Rakhimbekova et al., 2021) ont documenté le rôle des éléments nutritifs hérités (ceux générés par les pratiques de gestion historiques et ensuite lixiviés des sols ou retenus dans les aquifères ou les sédiments des cours d'eau) sur la qualité de l'eau en affinant la compréhension des décalages typiques associés au transport des éléments nutritifs dans une zone non saturée et des installations d'aquifères saturés. Green et al. (2018) ont estimé que le transport à travers une zone non saturée représente souvent 20 % du décalage total entre l'infiltration et l'arrivée dans des puits d'aquifères superficiels. Martin et al. (2021) ont élaboré une nouvelle méthode qui couple les cartes des sources d'azote avec les temps de transport des eaux souterraines pour créer des estimations du moment et de l'ampleur du flux d'azote vers les eaux de surface de la péninsule inférieure du Michigan, y compris les lacs Érié, Huron et Michigan. Les résultats sont encadrés par des calendriers de gestion pour les élus

(<5 ans), les gestionnaires de carrière (5 à 30 ans) et les groupes de défense (>30 ans) afin d'aider les parties prenantes à identifier les domaines de gestion prioritaires correspondant à leur calendrier d'influence. Les exemples de prévision du transport et de la charge des éléments nutritifs dans les puits et les eaux de surface (Nolan et al., 2018; Saleem et al., 2020; Martin et al., 2021) illustrent l'influence des éléments nutritifs hérités sur le retardement des améliorations futures de la qualité de l'eau dans toute la région des Grands Lacs, et mettent en évidence les défis supplémentaires causés par les actions retardées.

4.3.B. Rôle du phénomène des points chauds sur les flux d'éléments nutritifs de l'eau souterraine

Les points chauds et les moments chauds d'activité biogéochimique, collectivement appelés « phénomènes des points chauds », jouent un rôle disproportionné dans le devenir des rejets d'éléments nutritifs des eaux souterraines dans les plans d'eau. La grande variabilité spatiale et temporelle associée à ces phénomènes des points chauds complique la compréhension et la prévision des apports d'éléments nutritifs des eaux souterraines dans les Grands Lacs et leurs affluents. L'un des principaux phénomènes des points chauds qui peut affecter l'apport d'azote des eaux souterraines aux affluents des Grands Lacs est la dénitrification des zones riveraines; qui convertit principalement les nitrates en azote gazeux inerte. Zhao et al. (2021) fournissent un examen des voies d'élimination de l'azote dans les zones hyporhéiques et riveraines, et bon nombre de ces processus sont également applicables aux zones de d'émergence des eaux souterraines dans les zones littorales des Grands Lacs. Stelzer (2015) a constaté le rôle important du carbone disponible dans les sédiments des cours d'eau pour faciliter la dénitrification, qui historiquement pourrait être influencé par la perte de milieux humides et la canalisation des cours d'eau dans la région des Grands Lacs. Hill (2019) fournit également un examen de l'état actuel des connaissances sur l'élimination des nitrates dans les zones tampons riveraines et note que des recherches supplémentaires sont nécessaires sur les effets de l'élimination des nitrates à l'échelle du bassin versant et sur la façon dont les zones riveraines sont susceptibles de réagir à l'utilisation des terres et au changement climatique.

Peu d'informations sont connues en ce qui a trait à l'élimination du phosphore dans les zones riveraines. Cependant, des études récentes suggèrent que les zones riveraines peuvent agir uniquement comme des zones d'entreposage temporaire du phosphore (et non comme un puits final). Le phosphore piégé dans la zone riveraine peut être remobilisé vers la phase dissoute et délivré aux eaux de surface par le biais de l'écoulement de l'eau souterrain lorsque les conditions environnementales changent (p. ex. des nappes phréatiques élevées) (p. ex. Dupas et al., 2015; Gu et al., 2017; Vidon et al., 2019). Quatre sous-bassins hydrographiques imbriqués, dont l'utilisation des terres varie dans le sud rural de l'Ontario, ont été surveillés pour identifier les périodes de pointe et les zones d'exportation d'azote et de phosphore (Irvine et al., 2019). L'étude a conclu que les futures pratiques de gestion des terres et l'identification des phénomènes des points chauds devraient tenir compte des différences potentielles entre les contrôles des exportations d'azote et de phosphore et élaborer des stratégies pour atteindre les charges cibles

souhaitées pour chaque élément nutritif. Irvine et al. (2019) fait partie d'un nombre croissant d'études qui démontrent l'importance d'identifier les zones et les périodes essentielles dans lesquelles il est important de concentrer les efforts de gestion des éléments nutritifs pour maximiser le bénéfice environnemental.

Des informations détaillées, tant sur le plan spatial que temporel, sont nécessaires pour détecter et quantifier les répercussions des phénomènes points charge sur la charge en éléments nutritifs dans les Grands Lacs. Un article de synthèse de Bernhardt et al. (2017) a examiné l'ensemble de la littérature qui a cité l'article original « points chauds et moments chauds » de McClain et al. (2003) et a trouvé relativement peu d'exemples d'approches statistiques ou de modélisation rigoureuses qui permettraient aux scientifiques d'identifier et de simuler l'impact des phénomènes points chauds sur les processus écosystémiques. À ce titre, l'impact des phénomènes points chauds sur la charge en éléments nutritifs des eaux souterraines dans les eaux de surface du bassin des Grands Lacs demeure une lacune scientifique. En outre, Bernhardt et al. (2017) proposent que les termes « points chauds » et « moments chauds » soient actualisés en « points de contrôle de l'écosystème » pour refléter le fait que ces phénomènes doivent être d'une ampleur suffisante pour avoir un impact au niveau de l'écosystème et que l'hétérogénéité spatiale et temporelle est liée. Briggs et Hare (2018) suggèrent que les voies d'écoulement concentrées des eaux souterraines, telles que des grandes fractures du substratum rocheux et des éléments karstiques, qui se manifestent à la surface par des émergences préférentielles d'eaux souterraines, peuvent avoir une influence majeure sur les eaux de surface et que ces caractéristiques devraient donc être considérées comme des points de contrôle de l'écosystème. Les passages d'eau souterraine, notamment les drains souterrains agricoles, sont examinés plus en détail à la section 4.4 en tant que besoin scientifique émergent en ce qui concerne l'apport d'éléments nutritifs des eaux souterraines aux eaux des Grands Lacs.

4.3.C. Mise à l'échelle des connaissances propres au site

Bien que de nombreuses études à petite échelle aient porté sur le cycle et le transport d'éléments nutritifs des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs, des méthodes sont nécessaires pour mettre à l'échelle ces connaissances scientifiques afin de quantifier les conséquences des éléments nutritifs des eaux souterraines sur les eaux de surface à l'échelle des cours d'eau, des bassins versants et du bassin des Grands Lacs.

Le transfert des connaissances acquises à partir d'enquêtes spécifiques à l'échelle régionales, de l'ordre des bassins versants des Grands Lacs, est mis au défi par l'hétérogénéité de l'utilisation et de la gestion des terres, des sols, de la géologie, de l'hydrogéologie, de l'hydrologie et des facteurs climatiques dans les bassins versants. Par exemple, Roy et al. (2017), Spoelstra et al. (2017), Baer et al. (2019), et Spoelstra et al. (2020) ont quantifié la contribution des installations septiques aux charges en éléments nutritifs des eaux de surface sur des sites spécifiques du bassin ce qui, combiné aux méthodes SIG pour cartographier et quantifier les charges des installations septiques (Oldfield et al., 2020b), peut aider à combler les lacunes dans la quantification de la contribution des

charges en éléments nutritifs des installations septiques dans les Grands Lacs. D'autres analyses des lacunes peuvent aider à établir des priorités dans les efforts de recherche, tandis que les développements récents dans l'apprentissage automatique et la modélisation déterministe peuvent offrir des méthodes efficaces pour la mise à l'échelle quantitative des données et des connaissances acquises à petite échelle pour des évaluations à plus grande échelle. Par exemple, Tesoriero et al. (2017), Nolan et al. (2018), et Stackelberg et al. (2020) ont exploité des bases de données étatiques et fédérales, en combinaison avec des informations géographiques et des résultats de modèles d'écoulement des eaux souterraines locales, pour estimer les niveaux de nitrate, de fer, de pH (et d'autres constituants) dans l'espace, en profondeur et dans le temps à plusieurs échelles dans l'aquifère glaciaire du nord des États-Unis. Des méthodes similaires pourraient être employées dans la région des Grands Lacs et peuvent être complétées par les résultats du modèle d'écoulement des eaux souterraines pour améliorer la capacité prédictive (Fienen et al., 2015; Starn et Belitz, 2019; Starn et al., 2021). De même, les méthodes de SIG (Oldfield et al., 2020b) et les modèles numériques d'écoulement des eaux souterraines ont été utilisés pour étayer le transport des éléments nutritifs dans les aquifères et les eaux de surface (Hwang et al., 2019; White et al., 2020; Rakhimbekova et al., 2021). Un récent rapport du comité de coordination de la recherche du Conseil consultatif scientifique des Grands Lacs (2018) apporte son soutien à la poursuite du développement de tels outils dans les Grands Lacs. Enfin, les outils d'aide à la décision fondés sur des modèles analytiques (p. ex. Green et al., 2018), des modèles d'apprentissage automatique (p. ex. Nolan et al., 2018) ou des modèles numériques (p. ex. White et al., 2020) de l'écoulement des eaux souterraines et du transport réactif sont prometteurs pour aider les gestionnaires de ressources à comprendre les effets des mesures de gestion et des temps de latence des eaux souterraines sur les concentrations ou les charges futures d'éléments nutritifs; avec un développement déjà commencé dans le bassin des Grands Lacs (Juckem et al., 2021).

La généralisation des relations entre les contrôles du paysage et la lixiviation des éléments nutritifs vers les eaux souterraines peut également faciliter la mise à l'échelle de la recherche spécifique au site, notamment parce que des corrélations positives entre l'utilisation des terres agricoles et les charges élevées d'éléments nutritifs ont déjà été identifiées (Robertson et al., 2019). Cependant, la corrélation entre des utilisations spécifiques des terres et les résultats en matière de qualité de l'eau, sans parler de la quantification de ces relations, est difficile en raison du niveau de détail spatial, temporel et quantitatif requis pour les mesures des systèmes hydrologiques et des pratiques de gestion (Esmaeili et al., 2020). Malgré ces défis, des progrès récents ont été réalisés en termes d'affinement des contrôles du paysage sur les flux d'éléments nutritifs vers les eaux souterraines. Gardner et al. (2020) soulignent comment les différences dans les rotations de cultures, les conditions pédologiques et géologiques, ainsi que les régimes météorologiques sur trois sites du sud-ouest de l'Ontario influencent la lixiviation des nitrates. Saleem et al. (2020) ont approfondi ce point en utilisant des modèles déterministes pour démontrer que les PEG, basées sur la rotation des cultures, qui interrompent les rotations continues de maïs ou de maïs/soja en introduisant des cultures moins intensives

en azote (blé d'hiver et trèfle rouge), peuvent réduire considérablement la lixiviation des nitrates vers les aquifères dans une variété de conditions climatiques. Cependant, Esmaeili et al. (2020) notent qu'en raison des conditions météorologiques, qui peuvent mobiliser les éléments nutritifs entreposés dans le sol, l'efficacité des PEG est difficile à mesurer. Par conséquent, une surveillance pluriannuelle à pluri-décennale est nécessaire pour améliorer la quantification.

Dans le but de maximiser le rendement des efforts de recherche et d'atténuation, il pourrait être avantageux d'identifier les bassins versants prioritaires, dans les cas de l'impact des eaux souterraines sur l'apport des éléments nutritifs aux eaux des Grands Lacs. Le classement par ordre de priorité peut être fondé sur un certain nombre de facteurs, notamment : i) le potentiel des eaux souterraines en tant que voie importante pour l'apport de charges élevées d'éléments nutritifs aux eaux de surface dans le bassin hydrographique et ii) la quantité de données et de recherches connexes déjà effectuées dans le bassin hydrographique. Les bassins versants qui présentent un potentiel élevé d'apport de charges relativement importantes d'éléments nutritifs à un Grand Lac, par le biais des eaux souterraines, peuvent être identifiés à l'aide d'un certain nombre de méthodes, telles que le jaugeage des cours d'eau et l'échantillonnage des éléments nutritifs combinés à des indices de débit de base (p. ex. Neff et al. 2005) ou la modélisation du rendement en éléments nutritifs axée sur les eaux de surface (Robertson et al., 2019). On en sait moins sur les apports d'éléments nutritifs dans les zones littorales des Grands Lacs par le biais l'émergence directe des eaux souterraines. Knights et al. (2017) décrivent une nouvelle méthode d'estimation de la vulnérabilité de chaque Grand Lac à l'émergence directe d'éléments nutritifs par les eaux souterraines provenant de petits bassins versants côtiers.

Outre les travaux de Knights et al. (2017), d'autres recherches pourraient être menées pour évaluer le rôle de la charge des cours d'eau par les eaux souterraines, ce qui permettrait d'identifier les bassins versants prioritaires en fonction de leur potentiel actuel ou futur de charge en éléments nutritifs par les eaux souterraines. Les bassins versants à privilégier pour des recherches supplémentaires pourraient également être identifiés en fonction de facteurs qui s'appuient sur des activités antérieures ou en cours afin de maximiser le rendement des investissements dans la recherche. Ces facteurs pourraient inclure des évaluations antérieures des principales charges d'éléments nutritifs (décrites ci-dessus), une utilisation des terres structurée, qui pourrait simplifier les efforts de surveillance, des bassins versants déjà fortement instrumentés ou précédemment instrumentés avec de nombreuses données historiques, ou des bassins versants présentant un fort potentiel de coopération des propriétaires fonciers avec les chercheurs (p. ex. initiatives dirigées par des agriculteurs). Plusieurs initiatives liées aux éléments nutritifs et dirigées par des ministères du gouvernement canadien ont adopté un concept de bassins versants prioritaires en se concentrant sur le bassin du lac Érié ou sur ses sous-bassins versants (p. ex. l'Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques et les Programmes et l'Initiative des laboratoires vivants d'Agriculture et Agroalimentaire Canada; l'Initiative sur les éléments nutritifs des Grands Lacs et le Plan d'action des Grands Lacs d'Environnement et Changement climatique Canada). De même, aux États-Unis, le Natural

Resources Conservation Service (NRCS), l'Agence des États-Unis de protection de l'environnement (EPA) et les organismes d'État se sont associés dans le cadre de la National Water Quality Initiative (NWQI) pour identifier les bassins versants prioritaires dans tout le pays. Dans le cas des Grands Lacs, des bassins versants prioritaires ont été identifiés pour aider à cibler les travaux effectués dans le cadre de l'Initiative de restauration des Grands Lacs.

4.3.D. Évaluation de l'eau souterraine à l'échelle du bassin

L'évaluation de l'impact des éléments nutritifs provenant des eaux souterraines sur la qualité des eaux de surface dans le bassin des Grands Lacs nécessite des informations détaillées sur les pertes par lixiviation des éléments nutritifs, l'hydrogéologie du bassin et la biogéochimie des eaux souterraines, notamment pour les aquifères peu profonds et non confinés. Les évaluations futures des problèmes d'éléments nutritifs dérivés des eaux souterraines à l'échelle du BGL bénéficieraient de la normalisation des méthodes de collecte et d'analyse des échantillons entre les États membres et l'Ontario.

Les rapports 2017 et 2019 sur l'état des Grands Lacs (SOGL; ECCC & EPA 2017, 2021) comprennent une évaluation de la qualité des eaux souterraines pour le bassin des Grands Lacs. Ces évaluations sont basées sur des données relatives aux nitrates et aux chlorures provenant de puits peu profonds (<40m sous la surface du sol) collectées entre 2000 et 2015 et identifient un besoin d'amélioration des réseaux de surveillance existants pour combler les lacunes dans la couverture spatiale et en profondeur de ces réseaux. L'absence d'un réseau de puits approprié pour la surveillance et l'évaluation des eaux souterraines peu profondes est un problème dans de grandes parties des bassins du lac Supérieur et du lac Huron (SOGL 2019). Les prochains rapports de cette série viseront également à évaluer les tendances des concentrations de nitrates et de chlorures dans les eaux souterraines du bassin à l'aide de données actuelles et historiques. D'autres évaluations récentes à grande échelle de la qualité des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs, qui examinent les paramètres des éléments nutritifs, comprennent une étude dans le sud de l'Ontario par la Commission géologique de l'Ontario (Colgrove et Hamilton, 2018) et par Erickson et al. (2019) aux États-Unis. De même, aux États-Unis, Knights et al. (2017) ont utilisé des données hydrographiques à grande échelle et à haute résolution ainsi que des modèles hydroclimatiques et des données sur l'utilisation des terres pour identifier les zones côtières vulnérables aux charges élevées d'éléments nutritifs transportés par les eaux souterraines le long du littoral américain des Grands Lacs.

Pour estimer la charge en éléments nutritifs des eaux souterraines dans les Grands Lacs, par les voies directes (Émergence dans le littoral) et indirectes (écoulement de base vers les cours d'eau), les informations sur la concentration des éléments nutritifs dans les eaux souterraines doivent être utilisées conjointement avec des modèles intégrés d'eaux souterraines/eaux de surface et de biogéochimie. L'état actuel de la modélisation des eaux souterraines pour le bassin des Grands Lacs et les plans pour le développement d'un modèle intégré eaux souterraines/eaux de surface pour le bassin ont fait l'objet d'un récent

rapport à la Commission mixte internationale par le Comité de coordination de la recherche du Conseil consultatif scientifique des Grands Lacs (2018).

4.4 Besoins scientifiques émergents

Des recherches récentes suggèrent que la géochimie distincte de l'écoulement des eaux souterraines dans les cours d'eau et les lacs peut avoir une influence plus importante sur les proliférations d'algues qui se produisent dans les eaux de surface qu'on ne le pensait auparavant. Par exemple, par rapport au ruissellement de surface, Brookfield et al. (2021) soulignent que les eaux souterraines contiennent généralement des concentrations plus élevées de micronutriments (p. ex. le fer, la silice) qui sont importants pour certaines espèces d'algues et que les eaux souterraines fournissent une source plus stable d'éléments nutritifs, notamment dans des conditions de sécheresse. Les éléments nutritifs des eaux souterraines ont tendance à être principalement sous forme dissoute et ont un rapport A:P différent de celui de nombreuses eaux de surface. Les caractéristiques physiques et géochimiques des eaux souterraines peuvent jouer un rôle essentiel en affectant la croissance, le déclin et la toxicité des proliférations d'algues nuisibles et toxiques (Paerl et al. 2016, Paerl et al. 2020). Par conséquent, le rôle de l'écoulement des eaux souterraines sur la dynamique des proliférations d'algues nuisibles est identifié comme un besoin scientifique émergent.

Les voies préférentielles ou passages d'écoulement des eaux souterraines peuvent déplacer rapidement l'eau et les composantes dissoutes de la subsurface vers les eaux de surface. Ces passages peuvent être naturels (p. ex. grandes fractures du substratum rocheux, caractéristiques karstiques, failles) et artificiels (p. ex. drainage agricole par tuyaux enterrés) et sont souvent mal représentés dans les modèles de bassins versants (Briggs et Hare 2018). Le drainage par tuyaux enterrés est largement utilisé pour éliminer rapidement l'excès d'eau des champs agricoles qui auraient autrement un mauvais drainage. En interceptant les eaux souterraines peu profondes, le drainage par tuyaux enterrés constitue un mécanisme important pour transporter rapidement les éléments nutritifs lixiviés des champs agricoles vers les eaux de surface proches (Dinnes et al. 2002, Goeller et al. 2019), avec un potentiel minimal de transformation géochimique pendant le transport à l'intérieur des tuyaux ou pendant l'émergence à travers les sédiments sous les lacs et les cours d'eau. Sur trois sites du bassin du lac Érié, Hanrahan et al. (2020) ont examiné la perte d'éléments nutritifs par les drainages agricoles en fonction des caractéristiques environnementales et de gestion du site et ont conclu que différents facteurs ont une répercussion sur la perte d'azote et de phosphore par drainage par tuyaux enterrés, et que des scénarios de gestion spécifiques aux éléments nutritifs sont nécessaires pour atténuer ces répercussions. Williamson et al. (2019) ont utilisé la télédétection pour cartographier les réseaux de drainage par tuyaux enterrés sur un site de bord de champ dans le bassin versant du lac Érié, suggérant qu'une augmentation de la méthode avec des photos aériennes régionales ou des images satellites pourrait fournir un outil de cartographie à l'échelle du bassin. Les passages naturels, tels que les grandes fractures du substratum rocheux et les caractéristiques karstiques, peuvent également entraîner un transport rapide d'éléments

nutritifs et d'autres contaminants vers des puits et des plans d'eau (Briggs et Hare 2018, Borchardt et al. 2019, et Borchardt et al. 2021). Dans ce cas, les passages reliant des zones d'infiltration rapide aux lieux de d'émergence concentrée (sources, événements submergés) peuvent constituer la principale voie de transport à l'échelle locale et sous-régionale (Briggs et Hare 2018). En raison de leur capacité à favoriser le transport souterrain rapide des éléments nutritifs avec une transformation géochimique faible ou modérée (Husic et al. 2020) le long de la voie d'écoulement, les répercussions du drainage par tuyaux enterrés et des autres passages d'eau souterraine sur les bilans nutritifs des bassins versants est identifié comme un besoin scientifique émergent pour les Grands Lacs.

4.5 Mise à jour du tableau des besoins scientifiques prioritaires

Comme indiqué ci-dessus, des progrès sont réalisés pour répondre aux besoins scientifiques prioritaires liés aux problèmes des éléments nutritifs des eaux souterraines qui ont été identifiés dans le rapport de 2016 (tableau 4.1). Cela dit, des lacunes en matière d'information subsistent et des recherches supplémentaires sont nécessaires afin de développer une compréhension plus complète de la contribution des apports d'éléments nutritifs des eaux souterraines aux eaux de surface et de leur impact sur les écosystèmes des Grands Lacs. Les besoins scientifiques prioritaires actualisés présentés dans le tableau 4.2 s'étendent à ceux identifiés dans le rapport de 2016 pour inclure le rôle des eaux souterraines sur la dynamique des proliférations d'algues nuisibles et nocives, ainsi que la caractérisation du transport rapide par les tuyaux de drainage enterrés et les passages naturels. En outre, un énoncé de type politique dans 4A concernant la reconnaissance du lien entre la gestion des terres et la charge en éléments nutritifs est supprimé afin de rester concentré sur les priorités scientifiques.

Tableau 4.2 Mise à jour des besoins scientifiques prioritaires liés aux eaux souterraines et aux éléments nutritifs.

Besoins scientifiques prioritaires	Besoins connexes et lacunes en matière d'information
4A. Lien entre la gestion des terres et la charge en éléments nutritifs de l'eau souterraine	<ul style="list-style-type: none"> ● Évaluation des pratiques exemplaires gestion pour réduire l'exportation d'éléments nutritifs des eaux souterraines vers les eaux de surface. ● Comprendre le décalage temporel entre la mise en œuvre des pratiques exemplaires de gestion et l'amélioration de la qualité des eaux souterraines et de surface.
4B. Rôle du phénomène des points chauds sur les	<ul style="list-style-type: none"> ● Échantillonnage des eaux souterraines pour évaluer la variabilité spatiale et temporelle associée aux phénomènes des points chauds.

flux d'éléments nutritifs de l'eau souterraine	<ul style="list-style-type: none"> ● Recherche sur l'importance des phénomènes des points chauds dans les cas d'émergence directe d'éléments nutritifs des eaux souterraines dans les Grands Lacs.
4C. Mise à l'échelle des connaissances propres au site	<ul style="list-style-type: none"> ● Développement d'outils permettant de mettre à l'échelle les connaissances locales sur les eaux souterraines pour les appliquer à l'échelle des bassins versants et des bassins. ● Identifier les contrôles du paysage et biogéochimiques sur les flux d'éléments nutritifs des eaux souterraines. ● Identifier les bassins versants prioritaires sur lesquels concentrer les efforts de recherche.
4D. Évaluation de l'eau souterraine à l'échelle du bassin	<ul style="list-style-type: none"> ● Compiler les données historiques sur la qualité des eaux souterraines. ● Augmenter les réseaux de surveillance pour évaluer les tendances des éléments nutritifs des eaux souterraines. ● Évaluation systématique régulière des tendances des éléments nutritifs des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs. ● Accroître la disponibilité des produits de cartographie hydrogéologique.
4E. Effet des eaux souterraines sur la dynamique des proliférations d'algues	<ul style="list-style-type: none"> ● Approfondir la compréhension de l'influence des caractéristiques physiques et géochimiques uniques des eaux souterraines sur les proliférations d'algues nuisibles et nocives.
4F. Répercussion du drainage par tuyaux enterrés et des passages naturels d'eau souterraine sur la charge en éléments nutritifs.	<ul style="list-style-type: none"> ● Cartographier les réseaux de drainage par tuyaux enterrés et identifier les zones de passages naturels importants connus ou suspectés. ● Quantifier la charge en éléments nutritifs des eaux de surface provenant du drainage par tuyaux enterrés et des passages naturels d'eaux souterraines. ● Approfondir la compréhension de la transformation biogéochimique, le cas échéant, des éléments nutritifs le long du drainage par tuyaux enterrés et des passages. ● Quantifier comment la capture des éléments nutritifs infiltrés par le drainage par tuyaux enterrés modifie l'infiltration des éléments nutritifs vers la nappe phréatique.

Références:

Baer, S., Robertson, W., Spoelstra, J. and Schiff, S., 2019. Phosphorus and nitrogen loading to Lake Huron from septic systems at Grand Bend, ON. *Journal of Great Lakes Research*, 45(3), pp.642-650.

- Bernhardt, E.S., Blaszcak, J.R., Ficken, C.D., Fork, M.L., Kaiser, K.E. and Seybold, E.C., 2017. Control points in ecosystems: moving beyond the hot spot hot moment concept. *Ecosystems*, 20(4), pp.665-682.
- Borchardt, M.A., Muldoon, M.A., Hunt, R.J., Bonness, D.E., Firnstahl, A.D., Kieke, B.A. Jr., Owens, D.W., Spencer, S.K., Stokdyk, J.P., 2019. Assessing groundwater quality in Kewaunee County, Wisconsin and Characterising the timing and variability of enteric pathogen contamination within the dolomite aquifer in northeastern Wisconsin. Wisconsin Geological and Natural History Survey Open-File Report 2019-05, 128p., <https://wgnhs.wisc.edu/catalog/publication/000971/resource/wofr201905>.
- Borchardt, M.A., Stokdyk, J.P., Kieke, B.A. Jr, Muldoon, M.A., Spencer, S.K., Firnstahl, A.D., Bonness, D.E., Hunt, R.J., and Burch, T.R., 2021. Sources and Risk Factors for Nitrate and Microbial Contamination of Private Household Wells in the Fractured Dolomite Aquifer of Northeastern Wisconsin. *Environmental Health Perspectives* 129 (6): 1–18. doi.org/10.1289/EHP7813
- Briggs, M. A., and Hare, D.K., 2018. Explicit Consideration of Preferential Groundwater Discharges as Surface Water Ecosystem Control Points. *Hydrological Processes*, 32(15): 2435–40. [doi:10.1002/hyp.13178](https://doi.org/10.1002/hyp.13178).
- Brookfield, A.E., Hansen, A.T., Sullivan, P.L., Czuba, J.A., Kirk, M.F., Li, L., Newcomer, M.E., and Wilkinson, G., 2021. Predicting algal blooms: Are we overlooking groundwater? *Science of The Total Environment*, 769(11). [doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144442](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144442).
- Casillas-Ituarte, N.N., Sawyer, A.H., Danner, K.M., King, K.W. and Covault, A.J., 2019. Internal phosphorus storage in two headwater agricultural streams in the Lake Erie Basin. *Environmental Science & Technology*, 54(1), pp.176-183, DOI:10.1021/acs.est.9b04232
- Colgrove, L.M., Hamilton, S.M., 2018. Geospatial distribution of selected chemical, bacteriological and gas parameters related to groundwater in southern Ontario. Ontario Geological Survey, Groundwater Resources Study 17. 68p., <https://www.publications.gov.on.ca/CL29762>
- Council of Canadian Academies, 2013. Water and agriculture in Canada: Towards sustainable management of water resources. The Expert Panel on Sustainable Management of Water in the Agricultural Landscapes of Canada, Council of Canadian Academies. 259p. <https://cca-reports.ca/reports/water-and-agriculture-in-canada-towards-sustainable-management-of-water-resources/>
- Dierkes, C., 2019. Nitrogen Trackers. *Twine Line*, 41(3), pp.10-11. Nitrogen Trackers | Ohio Sea Grant, <https://ohioseagrant.osu.edu/news/2019/trlm4/nitrogen-trackers>.
- Dinnes, D.L., Karlen, D.L., Jaynes, D.B., Kaspar, T.C., Hatfield, J.L., Colvin, T.S., and Cambardella, C.A., 2002. Review and interpretation: Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained midwestern soils. *Agronomy Journal*, 94, pp.153–171.

- Domagalski, J.L., Johnson, H.M., 2011. Subsurface transport of orthophosphate in five agricultural watersheds, USA. *Journal of Hydrology*, 409, pp.157–171.
- Domagalski, J.L., Johnson, H., 2012. Phosphorus and groundwater: establishing links between agricultural use and transport to streams. U.S. Geological Survey, Fact Sheet 2012-3004, Sacramento, CA. <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3004/>
- Dupas, R., Gruau, G., Gu, S., Humbert, G., Jaffrézic, A. and Gascuel-Oudou, C., 2015. Groundwater control of biogeochemical processes causing phosphorus release from riparian wetlands. *Water research*, 84, pp.307-314.
- Environment and Climate Change Canada and the U.S. Environmental Protection Agency (ECCC & EPA), 2017. State of the Great Lakes 2017 Technical Report. Cat No. En161-3/1E-PDF. EPA 905-R-17-001. https://binational.net/wp-content/uploads/2017/09/SOGL_2017_Technical_Report-EN.pdf.
- Environment and Climate Change Canada and the U.S. Environmental Protection Agency, 2021. State of the Great Lakes 2019 Technical Report. Sub-indicator: Groundwater quality. 492-516. Cat No. En161-3/1E-PDF. EPA 905-R-20-044. https://binational.net/wp-content/uploads/2021/02/SOGL-19-Technical-Reports-compiled-2021_02_10.pdf. 668 pp.
- Esmaili, S., Thomson, N.R. and Rudolph, D.L., 2020. Evaluation of nutrient beneficial management practices on nitrate loading to groundwater in a Southern Ontario agricultural landscape. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 45(1), pp.90-107.
- Erickson, M.L., Yager, R.M., Kauffman, L.J. and Wilson, J.T., 2019. Drinking water quality in the glacial aquifer system, northern USA. *Science of The Total Environment*, 694, p.133735.
- Felix-Gerth, A., and Rhees, S., 2021. Groundwater / drinking water protection practices for agricultural lands. Minnesota Rural Water Association, 21p. http://bwsr.state.mn.us/sites/default/files/2021-03/GW%20Protection%20Guide_accessible.pdf.
- Fienen, M.N., Nolan, B.T., Feinstein, D.T. and Starn, J.J., 2015. Metamodels to bridge the gap between modeling and decision support. *Groundwater*, 53(4) pp. 511-512, doi:10.1111/gwat.12339
- Gardner, S.G., Levison, J., Parker, B.L. and Martin, R.C., 2020. Groundwater nitrate in three distinct hydrogeologic and land-use settings in southwestern Ontario, Canada. *Hydrogeology Journal*, 28(5), pp.1891-1908.
- Goeller, B.C., Febria, C.M., Warburton, H.J., Hogsdon, K.L., Collins, K.E., Devlin, H.S., Harding, J.S. and McIntosh, A.R., 2019. Springs Drive Downstream Nitrate Export from Artificially-Drained Agricultural Headwater Catchments. *Science of the Total Environment* 671, pp. 119–28. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.308.

- Grannemann, N.G., Hunt, R.J., Nicholas, J.R., Reilly, T.E., Winter, T.C., 2000. The importance of ground water in the Great Lakes region. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 00-4008, Lansing, MI. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/wri004008>.
- Grannemann, N., Van Stempvoort, D. Eds., 2016. Groundwater science relevant to the Great Lakes Water Quality Agreement: A status report. 101p. <https://binational.net/wp-content/uploads/2016/05/GW-Report-final-EN.pdf>.
- Great Lakes Science Advisory Board Research Coordination Committee, 2018. Great Lakes surface and groundwater model integration review: Literature review, options for approaches and preliminary action plan for the Great Lakes Basin. Report to the International Joint Commission. 62p. https://ijc.org/sites/default/files/2019-01/Great_Lakes_Surface_and_Groundwater_Model_Integration_Review_Oct2018.pdf
- Green, C.T., Liao, L., Nolan, B.T., Juckem, P.F., Shope, C.L., Tesoriero, A.J. and Jurgens, B.C., 2018. Regional variability of nitrate fluxes in the unsaturated zone and groundwater, Wisconsin, USA. *Water Resources Research*, 54(1), pp.301-322.
- Gu, S., Gruau, G., Dupas, R., Rumpel, C., Crème, A., Fovet, O., Gascuel-Oudou, C., Jeanneau, L., Humbert, G. and Petitjean, P., 2017. Release of dissolved phosphorus from riparian wetlands: Evidence for complex interactions among hydroclimate variability, topography and soil properties. *Science of the Total Environment*, 598, pp.421-431.
- Hamlin, Q.F., Kendall, A.D., Martin, S.L., Whitenack, H.D., Roush, J.A., Hannah, B.A., and Hyndman, D.W., 2020. Quantifying Landscape Nutrient Inputs With Spatially Explicit Nutrient Source Estimate Maps. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 125 (2): 1–24. doi:10.1029/2019JG005134.
- Hanrahan, B.R., King, K.W., Macrae, M.L., Williams, M.R. and Stinner, J.H., 2020. Among-site variability in environmental and management characteristics: Effect on nutrient loss in agricultural tile drainage. *Journal of Great Lakes Research*, 46(3), pp.486-499.
- Hwang, H.T., Frey, S.K., Park, Y.J., Pintar, K.D.M., Lapen, D.R., Thomas, J.L., Spoelstra, J., Schiff, S.L., Brown, S.J. and Sudicky, E.A., 2019. Estimating cumulative wastewater treatment plant discharge influences on acesulfame and Escherichia coli in a highly impacted watershed with a fully-integrated modelling approach. *Water research*, 157, pp.647-662.
- Husic, A., Fox, J., Adams, E., Pollock, E., Ford, W., Agouridis, C., and Backus, J., 2020. Quantification of nitrate fate in a karst conduit using stable isotopes and numerical modeling. *Water Research*, 170., pp. 1-13. doi:10.1016/j.watres.2019.115348.
- International Joint Commission, 2013. Assessment of progress made towards restoring and maintaining Great Lakes water quality since 1987. Sixteenth biennial report on Great

- Iowa State University, 2019. Reducing nutrient loss: science shows what works. SP435A, 4p.
<https://store.extension.iastate.edu/product/13960>
- Johnson, H.M. and Stets, E.G., 2020. Nitrate in streams during winter low-flow conditions as an indicator of legacy nitrate. *Water Resources Research*, 56(11), p.e2019WR026996.
- Juckem, P.F., C.T. Green, L.A. Schachter, N.T. Corson-Dosch, A.C. Baker, and M.N. Fienen, 2021. Developing a nitrate decision support tool for Wisconsin -- Phase 1: Scenarios for Drinking Water Wells. [Abstract], Proceedings of the Wisconsin Section of the American Water Resources Association Conference.
- Knights, D., Parks, K.C., Sawyer, A.H., David, C.H., Browning, T.N., Danner, K.M. and Wallace, C.D., 2017. Direct groundwater discharge and vulnerability to hidden nutrient loads along the Great Lakes coast of the United States. *Journal of Hydrology*, 554, pp.331-341.
- Martin, S.L., Hamlin, Q.F., Kendall, A.D., Wan, L. and Hydnman, D.W., 2021. The land use legacy effect: looking back to see a path forward to improve management. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe14c>
- McClain, M.E., Boyer, E.W., Dent, C.L., Gergel, S.E., Grimm, N.B., Groffman, P.M., Hart, S.C., Harvey, J.W., Johnston, C.A., Mayorga, E., McDowell, W.H., Pinay, G., 2003. Biogeochemical Hot Spots and Hot Moments at the Interface of Terrestrial and Aquatic Ecosystems. *Ecosystems*, 6, pp. 301–12. doi:10.1007/s10021-003-0161-9.
- McDowell, R.W., Cox, N., Daughney, C.J., Wheeler, D. and Moreau, M., 2015. A national assessment of the potential linkage between soil, and surface and groundwater concentrations of phosphorus. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(4), pp.992-1002.
- Neff, B.P., Day, S.M., Piggott, A.R., Fuller, L.,M., 2005. Base flow in the Great Lakes Basin: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5217, 23p.
- Nolan, B.T., Green, C.T., Juckem, P.F., Liao, L. and Reddy, J.E., 2018. Metamodeling and mapping of nitrate flux in the unsaturated zone and groundwater, Wisconsin, USA. *Journal of Hydrology*, 559, pp.428-441.
- Oldfield, L.E., Roy, J.W. and Robinson, C.E., 2020a. Investigating the use of the artificial sweetener acesulfame to evaluate septic system inputs and their nutrient loads to streams at the watershed scale. *Journal of Hydrology*, 587, p.124918.
- Oldfield, L., Rakhimbekova, S., Roy, J.W. and Robinson, C.E., 2020b. Estimation of phosphorus loads from septic systems to tributaries in the Canadian Lake Erie Basin. *Journal of Great Lakes Research*, 46(6), pp.1559-1569.

- Paerl, H.W., Scott, J.T., McCarthy, M.J., Newell, S.E., Gardner, W.S., Havens, K.E., Hoffman, D.K., Wilhelm, S.W., and Wurtsbaugh, W.A., 2016. It Takes Two to Tango: When and Where Dual Nutrient (N & P) Reductions Are Needed to Protect Lakes and Downstream Ecosystems. *Environmental Science and Technology* 50 (20): 10805–13. doi:10.1021/acs.est.6b02575.
- Paerl, H.W., Havens, K.E., Xu, H., Zhu, G., McCarthy, M.J., Newell, S.E., Scott, J.T., Hall, N.S., Otten, T.G., and Qin, B., 2020. Mitigating Eutrophication and Toxic Cyanobacterial Blooms in Large Lakes: The Evolution of a Dual Nutrient (N and P) Reduction Paradigm. *Hydrobiologia* 847 (21): 4359–75. doi:10.1007/s10750-019-04087-y.
- Phosphorus Reduction Task Force, 2012. Priorities for reducing phosphorus loadings and abating algae blooms in the Great Lakes-St Lawrence River Basin: Opportunities and challenges for improving Great Lakes aquatic ecosystems. Prepared for the Great Lakes Commission, Ann Arbor, MI. 40p. <https://core.ac.uk/outputs/233569697>
- Rakhimbekova, S., O'Carroll, D.M., Oldfield, L.E., Ptacek, C.J. and Robinson, C.E., 2021. Spatiotemporal controls on septic system derived nutrients in a nearshore aquifer and their discharge to a large lake. *Science of The Total Environment*, 752, p.141262.
- Robertson, D.M., Saad, D.A., Benoy, G.A., Vouk, I., Schwarz, G.E., and Laitta, M.T., 2019. Phosphorus and nitrogen transport in the binational Great Lakes Basin estimated using SPARROW watershed models. *Journal of the American Water Resources Association*, 55(6), 1401–24. doi:10.1111/1752-1688.12792.
- Robinson, C., 2015. Review on groundwater as a source of nutrients to the Great Lakes and their tributaries. *Journal of Great Lakes Research*, 41(4), pp.941-950.
- Robinson, C., J. Spoelstra, L. Nicks, M.E. Vollbrecht., 2016. Groundwater and nutrients. In: Grannemann, N., Van Stempvoort, D. Eds. Groundwater science relevant to the Great Lakes Water Quality Agreement: A status report. 30-38. <https://binational.net/wp-content/uploads/2016/05/GW-Report-final-EN.pdf>.
- Roy, J.W., Spoelstra, J., Robertson, W.D., Klemm, W. and Schiff, S.L., 2017. Contribution of phosphorus to Georgian Bay from groundwater of a coastal beach town with decommissioned septic systems. *Journal of Great Lakes Research*, 43(6), pp.1016-1029.
- Saleem, S., Levison, J., Parker, B., Martin, R. and Persaud, E., 2020. Impacts of climate change and different crop rotation scenarios on groundwater nitrate concentrations in a sandy aquifer. *Sustainability*, 12(3), p.1153.
- Schilling, K.E., Streeter, M.T., Quade, D. and Skopec, M., 2016. Groundwater loading of nitrate-nitrogen and phosphorus from watershed source areas to an Iowa Great Lake. *Journal of Great Lakes Research*, 42(3), pp.588-598.
- Spoelstra, J., Senger, N.D. and Schiff, S.L., 2017. Artificial sweeteners reveal septic system effluent in rural groundwater. *Journal of environmental quality*, 46(6), pp.1434-1443.

- Spoelstra, J., Schiff, S.L. and Brown, S.J., 2020. Septic systems contribute artificial sweeteners to streams through groundwater. *Journal of Hydrology X*, 7, p.100050.
- Stackelberg, P.E., Belitz, K., Brown, C.J., Erickson, M.L., Elliott, S.M., Kauffman, L.J., Ransom, K.M. and Reddy, J.E., 2020. Machine learning predictions of pH in the glacial aquifer system, northern USA. *Groundwater*. v. 59, no. 3, pg. 352-368, <https://doi.org/10.1111/gwat.13063>
- Starn, J. J., and Belitz, K., 2018. Regionalization of groundwater residence time using metamodeling. *Water Resources Research*, 54, 6357–6373. <https://doi.org/10.1029/2017WR021531>.
- Starn, J.J., Kauffman, L.J., Carlson, C.S., Reddy, J.E., and Fienen, M.N., 2021. Three-dimensional distribution of groundwater residence time metrics in the glaciated United States using metamodels trained on general numerical simulation models. *Water Resources Research* 57(2). <https://doi.org/10.1029/2020WR027335>.
- Stelzer, R.S., 2015. Yearlong impact of buried organic carbon on nitrate retention in stream sediments. *Journal of environmental quality*, 44(6), pp.1711-1719.
- Tesoriero, A.J., Gronberg, J.A., Juckem, P.F., Miller, M.P. and Austin, B.P., 2017. Predicting redox-sensitive contaminant concentrations in groundwater using random forest classification. *Water Resources Research*, 53(8), pp.7316-7331.
- Vidon, P.G., Welsh, M.K. and Hassanzadeh, Y.T., 2019. Twenty years of riparian zone research (1997–2017): Where to next?. *Journal of environmental quality*, 48(2), pp.248-260.
- Wang, B., Hipsey, M.R., Ahmed, S., and Oldham, C., 2018. The impact of landscape characteristics on groundwater dissolved organic nitrogen: Insights from machine learning methods and sensitivity analysis. *Water Resources Research*, 54, pp. 4785-4804. <https://doi.org/10.1029/2017WR021749>.
- White, J.T., Knowling, M.J., Fienen, M.N., Feinstein, D.T., McDonald, G.W., and Moore, C.R., 2020. A non-intrusive approach for efficient stochastic emulation and optimization of model-based nitrate-loading management decision support. *Environmental Modelling and Software*, 126 (January). Elsevier Ltd: 11. doi:10.1016/j.envsoft.2020.104657.
- Williamson, T.N., Dobrowolski, E.G., Meyer, S.M., Frey, J.W., and Alfred, B.J., 2019. Delineation of tile-drain networks using thermal and multispectral imagery -- Implications for water quantity and quality differences from paired edge-of-field sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(1), pp. 1-11. <https://doi.org/10.2489/jswc.74.1.1>.
- Zhao, S., Zhang, B., Sun, X. and Yang, L., 2021. Hot spots and hot moments of nitrogen removal from hyporheic and riparian zones: a review. *Science of The Total Environment*, p.144168.



Échantillonnage des eaux souterraines peu profondes dans le cadre des recherches menées par Environnement et Changement climatique Canada portant sur l'apport de phosphore par la résurgence directe d'eau souterraine dans la baie Georgienne, lac Huron (Ontario, Canada).

Crédit photo: John Spoelstra, Environnement et Changement climatique Canada

5 EAU SOUTERRAINE ET HABITATS DANS LES GRANDS LACS

John Spoelstra^{1,2}, Paul Seelbach³, James W. Roy¹, Chris Lowry⁴

¹ *Environnement et Changement climatique Canada, Burlington, ON, Canada*

² *Department of Earth and Environmental Sciences, Université de Waterloo, Waterloo, ON, Canada*

³ *University of Michigan, School for Environment and Sustainability, Ann Arbor, MI, USA*

⁴ *University at Buffalo, Department of Geology, Buffalo, NY, USA*

5.1 Introduction

L'eau souterraine du bassin des Grands Lacs a été décrite comme le sixième Grand Lac (Cohen 2009). Son entreposage et émergence ont des répercussions sur la disponibilité et la qualité des habitats aquatiques dans les lacs, les cours d'eau et les milieux humides du bassin des Grands Lacs en influençant les caractéristiques hydrologiques, thermiques et chimiques de ces eaux de surface (Grannemann et al., 2000). D'un point de vue hydrologique, l'émergence de l'eau souterraine peut fournir un approvisionnement continu en eau aux écosystèmes tout au long de l'année, en maintenant les débits ou les niveaux d'eau pendant l'hiver et les périodes sèches, atténuant ainsi les conséquences liées à la sécheresse. Étant donné que les températures de l'eau souterraine ont tendance à moins fluctuer que celles des eaux de surface, son émergence agit comme un tampon thermique, fournissant une source de chaleur en hiver et un effet de refroidissement en été. En outre, sa chimie influence les habitats aquatiques en tant que source de minéraux et de micronutriments, reflétant la géologie des matériaux qu'elle traverse avant leur émergence (Kløve et al., 2011). Cependant, l'eau souterraine peut également être une source de contaminants et d'excès d'éléments nutritifs dans les zones d'émergence, en particulier lorsque l'eau souterrain provient de voies d'écoulement relativement peu profondes qui sont impactées par des activités anthropiques d'affectation des terres (Kornelsen et Coulibaly 2014). Les contributions importantes que l'émergence des eaux souterraines apportent aux habitats aquatiques sont soutenues dans la terminologie « écosystèmes dépendants des eaux souterraines » (EDES), reconnaissant une gamme de processus dérivés des eaux souterraines qui maintiennent une fonction saine des écosystèmes aquatiques dans les lacs, les cours d'eau et les milieux humides.

Dans les lacs, l'émergence directe (lacustre) de l'eau souterraine se produit généralement dans l'environnement proche du rivage et diminue avec la distance au large (Kornelsen et Coulibaly 2014). Le littoral fonctionne comme une zone de transition entre le système terrestre et l'environnement d'eau libre des lacs et devient la zone la plus touchée par le ruissellement de la pollution, les fluctuations du niveau d'eau et le développement du littoral (Haack et al., 2005). La quantité d'eau souterraine émergeant dans le littoral et la

vitesse à laquelle elle se dilue dans l'eau du lac dépendent de plusieurs facteurs, dont la géologie locale, la physiographie du littoral et les modèles de circulation dans le lac (Haack et al., 2005). Ces zones d'émergence de l'eau souterraine à l'intérieur des lacs peuvent constituer des habitats importants pour les poissons et les invertébrés, leur permettant ainsi accomplir certaines parties de leur cycle de vie (Haack et al., 2005).

Le débit annuel des cours d'eau et des rivières peut être constitué d'une fraction importante, quoique variable, d'eau souterraine (p. ex. 40 à 75 %, Neff et al., 2005). L'émergence lente et constante de l'eau souterraine dans les cours d'eau maintient un débit de base entre les périodes de précipitation et durant l'hiver. De plus, cette émergence indirecte, par le biais du débit des affluents, est la plus grande source d'eau souterraine des Grands Lacs. Les effets de tampon thermique liés à l'émergence de l'eau souterraine maintiennent des refuges thermiques pour les espèces aquatiques sous forme de zones libres de glace, notamment sous la couverture de glace superficielle, pendant l'hiver et de zones d'eau fraîche pendant l'été (Power et al., 1999). En outre, le degré d'apport d'eau souterraine à l'échelle du bassin versant est le principal facteur déterminant le débit global du cours d'eau et les régimes de température estivale. Par conséquent, il s'agit d'un facteur clé pour déterminer si le cours d'eau est un habitat de poissons d'eau chaude ou d'eau froide (McKenna et al., 2018). À l'échelle locale, les zones distinctes d'émergence de l'eau souterraine dans les cours d'eau constituent des habitats importants pour les poissons et les invertébrés benthiques (Power et al., 1999; Hunt et al., 2006). Les espèces de poissons salmonidés, comme la truite et le saumon, profitent de la stabilité thermique et chimique des zones d'émergence des eaux souterraines locales en les utilisant comme sites de frai et refuges saisonniers (Power et al., 1999). L'eau souterraine exerce également une importante influence sur la chimie des cours d'eau et, si elles sont contaminées, peut nuire à la qualité des habitats aquatiques. Enfin, les niveaux et la dynamique de l'eau souterraine peuvent influencer le type de végétation riveraine dans les milieux humides des plaines d'inondation bordant les cours d'eau, ce qui entraîne des répercussions sur la composition de la végétation et, par conséquent, sur la stabilité des berges, l'ombrage et l'apport de matières organiques (Groeneveld et Griepentrog, 1985).

Sur le plan écologique, les milieux humides sont très diversifiés et productifs et l'eau souterraine joue un rôle important dans le soutien des habitats des milieux humides dans le bassin des Grands Lacs (Crowe et Shikaze, 2004). Parmi les cinq principaux types de milieux humides (milieux humides d'eau libre, marais, marécages, tourbières minérotrophes et tourbières ombrotrophes), l'émergence de l'eau souterraine est généralement associée aux tourbières minérotrophes. Cependant, les niveaux d'eau souterraine peuvent également affecter l'hydrologie des autres milieux humides dominés par les eaux de surface, qui ne sont pas directement affectées par l'émergence de l'eau souterraine au même degré que les tourbières minérotrophes. Les milieux humides intérieurs et côtiers sont des points chauds biogéochimiques fournissant des services écosystémiques, tels que le filtrage des polluants et des sédiments, la fourniture d'habitats de frai, le cycle et la rétention des éléments nutritifs, et la modulation des impacts des inondations et des sécheresses (Mitsch et Gosselink, 2015). Les milieux humides côtier

sont particulièrement importants dans les Grands Lacs car ils fournissent un habitat à de nombreuses plantes et animaux rares et menacés (p. ex. Cohen et al., 2010). Une source d'eau souterraine, un écosystème connexe et généralement plus petit, peut avoir sa propre flore et faune unique (Kløve et al., 2011).

En conclusion, l'écosystème de l'eau souterraine est un écosystème aquatique qui n'a pas été abordé dans le rapport original (Chu et al., 2016). Il comprend des systèmes karstiques et de grottes de subsurface, ainsi qu'un espace interstitiel au sein des aquifères (Soares et al., 2021), s'étendant des sédiments peu profonds des plans d'eau de surface à plusieurs kilomètres de profondeur (Danielopol et al., 2003). Ces écosystèmes contiennent une vie animale macroscopique unique (p. ex. des poissons aveugles, des crabes translucides dans les systèmes de grottes, ainsi que divers crustacés, arthropodes, isopodes, mollusques ou nématodes) (Humphreys, 2009). L'écosystème des eaux souterraines n'a pas encore reçu une attention substantielle en Amérique du Nord, mais il a fait l'objet de nombreuses études en Europe et en Australie (Humphreys, 2009). Les derniers progrès dans ce domaine sont axés sur l'incorporation d'évaluations génomiques (p. ex. Boyd et al., 2020), l'étude des dégradations dues aux contaminants toxiques (p. ex. Di Lorenzo et al., 2019) et aux changements d'affectation des terres (p. ex. Español et al., 2017), ainsi que l'évaluation de la façon dont ces organismes peuvent influencer ou être influencés par les propriétés hydrauliques des systèmes d'écoulement de l'eau souterraine (p. ex. Hose et Stumpp, 2019).

5.2 Besoins scientifiques prioritaires identifiés dans le rapport de 2016

Le chapitre cinq (Chu et al., 2016) du rapport de 2016 (Grannemann et Van Stempvoort, 2016) a identifié cinq besoins scientifiques prioritaires liés aux habitats aquatiques dépendant des eaux souterraines (tableau 5.1).

Tableau 5.1 Besoins scientifiques prioritaires liés aux habitats aquatiques. (Chu et al., 2016).

Besoins scientifiques prioritaires	Besoins connexes et lacunes dans les renseignements
5A. Cartographier la recharge de la nappe et l'émergence de l'eau souterraine	<ul style="list-style-type: none"> ● Intégration des données de surveillance et des outils de modélisation pour cartographier les zones de recharge et d'émergence des eaux souterraines à l'échelle du bassin des Grands Lacs.
5B. Combiner les modèles d'eau souterraine et les autres modèles écosystémiques, notamment les modèles portant sur l'hydrodynamique des eaux littorales ainsi que les modèles hydrologiques	<ul style="list-style-type: none"> ● Lier les modèles de recharge et d'émergence des eaux souterraines aux modèles hydrologiques afin de déterminer les habitats tributaires des eaux souterraines dans les milieux humides, les cours d'eau et les eaux littorales des Grands Lacs.

et thermiques des affluents et des milieux humides	
5C. Évaluer l'importance de l'émergence d'eau souterraine sur la répartition des espèces et les caractéristiques des écosystèmes	<ul style="list-style-type: none"> ● Cartes représentant l'émergence directe des eaux souterraines dans les Grands Lacs. ● Modèles du bilan hydrologique concernant l'émergence directe des eaux souterraines dans les Grands Lacs. ● Meilleure compréhension de l'influence de l'émergence directe des eaux souterraines sur la répartition et l'habitat des espèces des Grands Lacs.
5D. Évaluer l'importance de l'effet des tendances spatiales de l'émergence d'eau souterraine sur les caractéristiques des écosystèmes	<ul style="list-style-type: none"> ● Recherche de liens entre les tendances spatiales dans les zones de recharge en eau souterraine et d'émergence des eaux souterraines et la dispersion de l'habitat, la répartition des espèces ainsi que la fonction de l'écosystème.
5E. Répertorier les écosystèmes qui sont vulnérables aux changements sur le plan de l'émergence de l'eau souterraine	<ul style="list-style-type: none"> ● Cartographie des écosystèmes tributaires de l'eau souterraine dans le bassin des Grands Lacs. ● Évaluation de leur exposition et de leur sensibilité aux variations dans l'eau souterraine et à d'autres facteurs de stress (p. ex. aménagement d'un bassin versant). ● Établissement de l'ordre de priorité relativement à la conservation de ces écosystèmes tributaires de l'eau souterraine.

5.3 Mise à jour des besoins scientifiques prioritaires

La dépendance des eaux souterraines est complexe à évaluer. Premièrement, il existe une gradation dans la contribution relative aux différentes eaux de surface qui peut différer considérablement selon les échelles spatiales. De plus, l'importance de la contribution des eaux souterraines peut ne pas correspondre à leur contribution relative d'eau au système. Par exemple, un cours d'eau frais avec un apport mineur d'eau souterraine peut être plus sensible à de petits changements par rapport à un cours d'eau froid avec des apports importants d'eaux souterraines.

Pour comprendre les conséquences potentielles des changements naturels et anthropiques sur les habitats aquatiques dépendant des eaux souterraines, il est nécessaire de disposer de modèles d'eaux souterraines pour simuler la recharge, l'écoulement et l'émergence des eaux souterraines vers des plans d'eau de surface (rivières, milieux humides et lacs). Un récent rapport à la CMI examine l'état actuel de la modélisation hydrologique pertinente pour le bassin des Grands Lacs et propose un plan d'action pour développer un modèle intégré des eaux souterraines et de surface pour le bassin des Grands Lacs (Conseil consultatif scientifique des Grands Lacs, Comité de coordination de la recherche 2018).

Plusieurs moyens potentiels existent pour identifier et caractériser les écosystèmes aquatiques dépendant de l'eau souterraine dans le bassin des Grands Lacs. Ces moyens comprennent la cartographie sur le terrain, la télédétection, les cartes ou indices de paramètres connexes (comme l'indice de débit de base des cours d'eau) et la modélisation numérique. Des efforts considérables ont déjà été déployés pour dresser un inventaire des milieux humides côtiers des Grands Lacs. Les résultats de ces efforts comprennent :

- Le Great Lakes Coastal Wetland Monitoring Program (GLCWMP) mise en place par le Great Lakes Coastal Wetland Consortium (GLCWC; <https://www.greatlakeswetlands.org/Map.vbhtml>) (Ingram et al., 2004)
- Le Ontario Great Lakes Coastal Wetland Atlas (Ball et al., 2003)
- Le McMaster Coastal Wetland Inventory (MCWI; <https://greatlakeswetlands.ca/learn/wetland-inventories/>)
- Carte des milieux humides côtiers des Grands Lacs et de l'utilisation des terres élaborée par télédétection (Bourgeau-Chavez et al., 2015)
- Cartographie et caractérisation des milieux humides côtiers dans le cadre du Michigan natural Features Inventory (e.g., Albert, 2003; Cohen et al., 2010)

Bien que les bases de données énumérées ci-dessus incluent tous les milieux humides côtiers de taille suffisante, un sous-ensemble d'entre eux dépendent spécifiquement de l'émergence des eaux souterraines et pourraient potentiellement être identifiés à partir de certains des caractéristiques des milieux humides enregistrés (p. ex. le type de milieu humide, la végétation dominante). Knights et al. (2017) ont utilisé des modèles hydroclimatiques et des données hydrographiques à haute résolution pour cartographier l'émergence estimée de l'eau souterraine le long de toute la côte américaine des Grands Lacs. Utilisée en combinaison avec la cartographie existante des milieux humides côtiers des GL, l'approche de Knights et al. (2017) pourrait aider à identifier les écosystèmes dépendant des eaux souterraines.

De même, l'identification, la classification et la cartographie des milieux humides intérieures sont disponibles sur diverses plateformes, telles que CarrefourGéo Ontario (<https://geohub.lio.gov.on.ca/>) et le Wetlands Map Viewer du Michigan (<https://www.mcgi.state.mi.us/wetlands/mcgiMap.html>). Les caractéristiques des bassins versants, comme la topographie et les paramètres hydrauliques de la géologie superficielle, ont été utilisées pour estimer la dépendance des forêts riveraines du Michigan à l'égard des eaux souterraines et la relation avec la composition des espèces d'arbres dans ces habitats (p. ex. Baker et coll., 2003 ; Baker et Wiley, 2004, 2009).

Pour les lacs intérieurs, le Midwest Glacial Lakes Partnership (<https://midwestglaciallakes.org/>) a construit une carte pour 40 000 lacs du MN, du WI et du MI qui place chaque lac dans son bassin versant en amont et dans les contextes tampons

locaux, et contient les données disponibles sur les caractéristiques limnologiques et la structure des communautés de poissons. Ce système n'a pas mis l'accent sur les eaux souterraines mais pourrait être relié à des modèles régionaux pour réaliser cette tâche de cartographie des écosystèmes lacustres dépendant des eaux souterraines et être étendu au reste du bassin des Grands Lacs.

Il est bien connu que l'émergence de l'eau souterraine dans les cours d'eau influence fortement la température de ces derniers et qu'il existe un lien direct entre la température de l'eau et l'adéquation de l'habitat pour diverses espèces de poissons. Dans le bassin des Grands Lacs, et plus précisément dans le Michigan et le Wisconsin, de nombreuses études ont démontré cette relation et classé les cours d'eau et les habitats des cours d'eau en fonction du régime thermique (p. ex. Wehrly et al., 2003, 2006; Zorn et al., 2002, 2011; Seelbach et al., 2006; Lyons et al., 2009). Plus récemment, McKenna et al. (2018) ont élaboré ces concepts pour créer un système de classification taille-température des rivières pour l'ensemble du drainage des Grands Lacs américains, système qui pourrait être étendu à l'ensemble du bassin des Grands Lacs. Ce système de classification comprend l'identification des apports d'eau souterraine en estimant le rendement du débit de base estival et peut être utilisé pour prédire la sensibilité des cours d'eau et des poissons aux altérations du débit, y compris les changements dans l'émergence de l'eau souterraine. L'Ontario a également proposé l'élaboration d'un système de cartographie et de classification des écosystèmes fluviaux, comprenant la classification des régimes thermiques liés à l'indice de débit de base (Melles et al., 2013). Les émergences d'eau souterraine localisées, souvent associées à des habitats essentiels pour le frai des poissons et les refuges thermiques, sont plus difficiles à cartographier à l'aide d'outils à grande échelle comme la télédétection ou des modèles à l'échelle du bassin. L'identification et la cartographie de ces caractéristiques dans le BGL nécessitent probablement un effort coordonné de collecte des connaissances locales auprès des propriétaires fonciers, des autorités de conservation, des pêcheurs à la ligne, etc.

Afin d'établir un ordre de priorités des efforts de conservation, les habitats aquatiques dépendant des eaux souterraines doivent être évalués en fonction de leur vulnérabilité aux changements environnementaux. Pour être efficace dans la prévision des répercussions sur les écosystèmes dépendant des eaux souterraines et dans l'évaluation de la vulnérabilité, les modèles d'eaux souterraines et de surface doivent être intégrés à d'autres modèles d'écosystèmes et à d'autres outils pour comprendre plus précisément l'influence physique, hydrologique, hydraulique et chimique des eaux souterraines sur les habitats aquatiques. Plusieurs études récentes montrent les progrès réalisés dans l'évaluation de la vulnérabilité des écosystèmes des milieux humides et des cours d'eau à divers facteurs de stress. Bourgeau-Chavez et al. (2015) ont utilisé des techniques de télédétection pour cartographier et classer les milieux humides côtiers pour l'ensemble du BGL. En outre, ils ont identifié l'utilisation des terres adjacentes pour l'évaluer comme facteur de stress potentiel des milieux humides. Danz et al. (2007) ont élaboré un indice de stress cumulatif pour le côté américain du BGL qui intègre de multiples facteurs de stress anthropiques et peut être utilisé pour identifier les écosystèmes vulnérables et guider les efforts de

protection et d'atténuation. Uzarski et al. (2017, 2019) ont présenté des méthodes et des indicateurs normalisés pour évaluer l'état des milieux humides côtiers dans l'ensemble du BGL.

Cette approche écosystémique utilise des indicateurs comprenant des poissons, des macroinvertébrés, la qualité de l'eau et la végétation, permettant d'être utile dans sa forme actuelle ou modifiée pour évaluer l'état des écosystèmes dépendant des eaux souterraines spécifiquement et leur vulnérabilité potentielle. Condon & Maxwell (2019) ont utilisé un modèle hydrologique intégré qui simule les répercussions du pompage des eaux souterraines et des baisses de stockage à long terme sur le débit des cours d'eau et l'évapotranspiration dans une grande partie des États-Unis continentaux, y compris la plupart des parties américaines et canadiennes du bassin des Grands Lacs. Persaud et al. (2020) ont étudié l'impact du forçage climatique futur sur les eaux souterraines et de surface dans un bassin des Grands Lacs. Kath et al. (2018) ont présenté un cadre conceptuel pour évaluer les réponses écologiques associées aux facteurs de stress qui ont un impact sur les eaux souterraines (p. ex. l'extraction d'eau ou le changement climatique). Les répercussions sur les habitats dépendant des eaux souterraines pourraient être l'un des services écosystémiques évalués à l'aide de ce cadre. Bien que les études mentionnées ci-dessus ne soient pas nécessairement axées sur les écosystèmes dépendant des eaux souterraines, ces bases de données et ces approches à grande échelle sont potentiellement utiles pour identifier et évaluer les écosystèmes dépendant des eaux souterraines qui sont vulnérables aux changements de quantité, de qualité des eaux souterraines ou à d'autres facteurs de stress anthropiques.

L'influence des tendances spatiales ou de la répartition de l'émergence des eaux souterraines dans les cours d'eau et les environnements littoraux sur la structure des communautés et la fonction écosystémique n'est pas bien connue. Si l'on connaît assez bien l'influence de l'eau souterraine sur les principales espèces halieutiques, tant à l'échelle du cours d'eau qu'à celle de la parcelle, c'est moins le cas pour d'autres espèces aquatiques. Des travaux récents sur les espèces de moules suggèrent que l'eau souterraine joue un rôle dans leur distribution (Rosenberry et al., 2016; Campbell & Prestegard, 2016). Carlson Mazur et al. (2020) et Wilcox et al. (2020a,b) ont étudié comment la variation de l'hydrogéologie et la morphologie du relief affectent la composition des communautés végétales dans deux complexes de milieux humides côtiers des Grands Lacs.

Ces dernières années, un intérêt accru s'est également manifesté pour mieux comprendre les sédiments des cours d'eau en tant que composante importante de l'habitat dans les écosystèmes aquatiques. Les sédiments peuvent potentiellement être exposés aux contaminants des eaux souterraines et de surface. Peralta-Maraver et al. (2018) ont récemment démontré que l'hyporhéos (zone de transition des eaux souterraines de subsurface) peut être distingué du benthique en tant que communauté discrète avec une intégrité écologique, mais que la limite peut varier dans le temps en fonction des conditions hydrologiques dynamiques.

En plus des études menées dans le bassin des Grands Lacs, d'autres études réalisées ailleurs en Amérique du Nord sont pertinentes pour comprendre l'écologie des écosystèmes dépendant de l'eau souterraine et évaluer leur vulnérabilité aux facteurs de stress. Plusieurs études ont examiné la relation entre l'émergence de l'eau souterraine et l'habitat de frai des poissons. Par exemple, Briggs et al. (2018) ont examiné un tronçon de deux kilomètres de la rivière Quashnet, au Massachusetts, et ont constaté que l'omble de fontaine préférait frayer dans des zones où l'émergence d'eau souterraine résultait de voies d'écoulement relativement peu profondes afin d'éviter la matière organique enfouie dans les sédiments. Cette eau souterraine, riche en oxygène provenant de voies d'écoulement souterraines localisées, était plus déterminant dans la définition de l'habitat de frai que des sources d'eau souterraine plus régionales; bien que les deux types d'eau souterraine puissent être importants pour maintenir les caractéristiques thermiques globales des cours d'eau qui en font un habitat approprié pour divers assemblages de poissons. Larsen & Woelfle-Erskine (2018) ont également démontré que le maintien de niveaux d'eau souterraine relativement élevés dans les aquifères côtiers peut être nécessaire pour protéger l'habitat dans les cours d'eau intermittents utilisés par les saumons cohos juvéniles.

Dans la Snake Valley de l'Utah, Grover (2019) a examiné la relation entre les niveaux des eaux souterraines et des eaux de surface et la distribution et l'habitat de deux poissons cyprinidés dans un complexe de sources souterraines. Il a été constaté que les niveaux de l'eau souterrain expliquaient les variations des niveaux des eaux de surface. Par conséquent, sur le long terme, des baisses des niveaux d'eaux souterraine de seulement 40 cm élimineraient la plupart des zones de frai, expliquant ainsi le lien déterminant entre les eaux souterraines et l'habitat aquatique. Perkin et al. (2017) ont modélisé les conséquences écologiques sur les assemblages de poissons des cours d'eau associées au pompage de l'eau souterraine dans l'aquifère des hautes plaines américaines. Leur travail illustre la perte de cours d'eau associée à une profondeur accrue de l'eau souterraine et la perte de diversité qui en résulte par l'homogénéisation des assemblages de poissons.

Dans la région des fondrières des Prairies du Midwest, Euliss et al. (2014) ont caractérisé les schémas d'écoulement de l'eau souterraine, de l'émergence à la recharge et absorbant/infiltrant. Les différences de salinité qui en résultent expliquent les différences spectaculaires dans les communautés de macroinvertébrés aquatiques entre les types de marmites qui avaient été observées précédemment par Euliss et al. (2004).

5.4 Mise à jour du tableau sur les besoins scientifiques prioritaires

Les besoins scientifiques liés aux habitats dépendant de l'eau souterraine dans le bassin des Grands Lacs ont un certain chevauchement avec les besoins scientifiques identifiés dans d'autres chapitres du présent rapport, notamment le chapitre 2, Interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Par exemple, l'ancien besoin prioritaire 5A (tableau 5.1) relève du domaine du chapitre 2, mais sera utile pour guider l'identification des écosystèmes dépendant de l'eau souterraine, tel que décrit dans l'ancien besoin prioritaire 5B (tableau 5.1). Les besoins scientifiques actualisés liés aux habitats dépendant de l'eau

souterraine (tableau 5.2) ont été réduits en nombre et sont plus strictement axés sur le lien entre les eaux souterraines et les habitats, laissant l'exigence continue de la cartographie de l'écoulement des eaux souterraines au chapitre 2 de ce rapport actualisé.

Tableau 5.2 Mise à jour des besoins scientifiques prioritaires liés aux habitats aquatiques.

Besoins scientifiques prioritaires	Besoins connexes et lacunes dans les renseignements
5A. Modèles d'eaux souterraines qui permettent de caractériser les schémas et les tendances spatiales de recharge et d'émergence des eaux souterraines vers les eaux de surface.	<ul style="list-style-type: none"> ● Compilation et intégration des données de surveillance et des outils de modélisation. ● Utilisation des capacités de modélisation pour caractériser et cartographier la recharge et l'émergence des eaux souterraines à l'échelle régionale et locale.
5B. Intégrer ou aligner les modèles d'émergence des eaux souterraines avec les modèles qui contrôlent d'autres caractéristiques des écosystèmes dépendant des eaux souterraines.	<ul style="list-style-type: none"> ● Modèles intégrés d'eaux souterraines et d'eaux de surface pour une meilleure compréhension des habitats dépendant des eaux souterraines à l'échelle régionale et locale. ● Les besoins en modélisation comprennent des modèles hydrodynamiques du littoral et des modèles hydrologiques et thermiques pour les écosystèmes intérieurs dépendant des eaux souterraines (rivières, milieux humides, lacs).
5C. Déterminer l'influence de l'émergence des eaux souterraines (quantité et qualité) sur les caractéristiques des écosystèmes dépendant des eaux souterraines et sur la distribution des espèces.	<ul style="list-style-type: none"> ● S'appuyer sur les connaissances existantes et sous-régionales de l'influence des eaux souterraines sur les caractéristiques des écosystèmes ayant un impact sur la disponibilité et l'adéquation des habitats. ● Examiner le rôle des eaux souterraines pour déterminer les effets des changements climatiques futurs sur les communautés biotiques, en particulier les milieux humides. ● Améliorer la compréhension de l'influence de l'émergence des eaux souterraines littorales sur les habitats côtiers des Grands Lacs et la distribution des espèces. ● Poursuite des travaux sur les espèces de poissons, mais élargissement à d'autres biotes aquatiques ayant reçu moins d'attention jusqu'à présent (p. ex. moules d'eau douce, végétation).
5D. Classer et cartographier les écosystèmes dépendant des eaux souterraines dans le bassin.	<ul style="list-style-type: none"> ● Cartographier et classer les écosystèmes dépendant de l'eau souterraine dans l'ensemble du bassin. ● Le système de classification doit être à l'échelle du bassin, hiérarchique, et aider à l'évaluation de la sensibilité des écosystèmes dépendant de l'eau souterraine. ● Évaluer la sensibilité des écosystèmes dépendant de l'eau souterraine à la variation de l'eau souterraine due au changement

Références:

- Albert, D.A., 2003. Between land and lake: Michigan's Great Lakes coastal wetlands. Michigan Natural Features Inventory, Michigan State University. *Extension bulletin E-2902, East Lansing, 96.*
- Baker, M., Wiley, M., Carlson, M. and Seelbach, P.W., 2003. A GIS model of subsurface water potential for aquatic resource inventory, assessment, and environmental management. *Environmental Management* 32(6): 706-719.
- Baker, M.E. and Wiley, M.J., 2004. Characterization of woody species distribution in riparian forests of lower Michigan, USA using map-based models. *Wetlands* 24(3): 550-561.
- Baker, M.E. and Wiley, M.J., 2009. Multiscale control of flooding and riparian-forest composition in Lower Michigan, USA. *Ecology* 90(1): 145-159.
- Ball, H., Jalava, J., King, T., Maynard, L., Potter, B., Pulfer, T., 2003. The Ontario Great Lakes coastal wetland atlas: A summary of information (1983-1997). 49p.
- Bourgeau-Chavez, L., Endres, S., Battaglia, M., Miller, M.E., Banda, E., Laubach, Z., Higman, P., Chow-Fraser, P. and Marcaccio, J., 2015. Development of a bi-national Great Lakes coastal wetland and land use map using three-season PALSAR and Landsat imagery. *Remote Sensing* 7(7): 8655-8682.
- Boyd, S.H., Niemiller, K.D.K., Dooley, K.E., Nix, J. and Niemiller, M.L., 2020. Using environmental DNA methods to survey for rare groundwater fauna: Detection of an endangered endemic cave crayfish in northern Alabama. *Plos one* 15(12), p.e0242741.
- Briggs, M.A., Harvey, J.W., Hurley, S.T., Rosenberry, D.O., McCobb, T., Werkema, D. and Lane Jr, J.W., 2018. Hydrogeochemical controls on brook trout spawning habitats in a coastal stream. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(12): 6383-6398.
- Carlson Mazur, M.L., Wilcox, D.A. and Wiley, M.J., 2020. Hydrogeology and Landform Morphology Affect Plant Communities in a Great Lakes Ridge-and-Swale Wetland Complex. *Wetlands* 40(6): 2209-2224.
- Chu, C., M. Diebel, M. Mitro, C. Portt. (2016) Groundwater and aquatic habitats in the Great Lakes. In: Grannemann, N., Van Stempvoort, D. Eds. Groundwater science relevant to the Great Lakes Water Quality Agreement: A status report. 39-45. <https://binational.net/wp-content/uploads/2016/05/GW-Report-final-EN.pdf>.
- Cohen, A., 2009. The sixth Great Lake: Groundwater in the Great Lakes – St. Lawrence Basin. Program on Water Governance.

http://watergovernance.sites.olt.ubc.ca/files/2009/09/Groundwater_in_the_Great_Lakes.pdf

- Cohen, J.G., Albert, D.A., Kost, M.A. and Slaughter, B.S., 2010. Natural community abstract for coastal fen. *Michigan Natural Features Inventory, Lansing, MI*.
- Crowe, A.S. and Shikaze, S.G., 2004. Linkages between groundwater and coastal wetlands of the Laurentian Great Lakes. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 7: 199-213.
- Danielopol, D.L., Griebler, C., Gunatilaka, A. and Notenboom, J., 2003. Present state and future prospects for groundwater ecosystems. *Environmental Conservation* 30(2): 104-130.
- Di Lorenzo, T., Hose, G.C. and Galassi, D.M., 2020. Assessment of different contaminants in freshwater: Origin, fate and ecological impact. *Water* 12(6), 1810.
- Español, C., Comín, F.A., Gallardo, B., Yao, J., Yela, J.L., Carranza, F., Zabaleta, A., Ladera, J., Martínez-Santos, M., Gerino, M. and Sauvage, S., 2017. Does land use impact on groundwater invertebrate diversity and functionality in floodplains?. *Ecological Engineering* 103: 394-403.
- Euliss, N.H. Jr., LaBaugh, J.W., Fredrickson, L.H., Mushet, D.M., Swanson, G.A., Winter, T.C., Rosenberry, D.O., and Nelson, R.D., 2004. The wetland continuum: a conceptual framework for interpreting biological studies. *Wetlands* 24: 448–458.
- Euliss, N.E. Jr, Mushet, D.M., Newton, W.E., Otto, C.R.V., Nelson, R.D., LaBaugh, J.W., Scherff, E.J. and Rosenberry, D.O., 2014. Placing prairie pothole wetlands along spatial and temporal continua to improve integration of wetland function in ecological investigations. *Journal of Hydrology* 513: 490-503.
- Grannemann N.G., Hunt, R.J., Nicholas, J.R., Reilly, T.E., Winter, T.C., 2000. The importance of ground water in the Great Lakes Region. Lansing (MI): US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4008. 19p.
- Grannemann, N., Van Stempvoort, D. Eds. 2016. Groundwater science relevant to the Great Lakes Water Quality Agreement: A status report. 101p. <https://binational.net/wp-content/uploads/2016/05/GW-Report-final-EN.pdf>.
- Great Lakes Science Advisory Board Research Coordination Committee. 2018. Great Lakes surface and groundwater model integration review: Literature review, options for approaches and preliminary action plan for the Great Lakes Basin. Report to the International Joint Commission. 62p.
- Groeneveld, D.P. and Griepentrog, T.E., 1985. Interdependence of groundwater, riparian vegetation, and streambank stability: a case study. USDA Forest Service General Technical Report RM, 120, 44-48.

- Grover, M.C., 2019. Effects of groundwater fluctuations on the distribution and population structure of two cyprinid fishes in a desert spring complex. *Journal of Freshwater Ecology* 34(1): 167-187.
- Haack, S.K., Neff, B.P., Rosenberry, D.O., Savino, J.F. and Lundstrom, S.C., 2005. An evaluation of effects of groundwater exchange on nearshore habitats and water quality of western Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research* 31: 45-63.
- Hose, G.C. and Stumpff, C., 2019. Architects of the underworld: bioturbation by groundwater invertebrates influences aquifer hydraulic properties. *Aquatic sciences* 81(1): 20.
- Humphreys, W.F., 2009. Hydrogeology and groundwater ecology: Does each inform the other?. *Hydrogeology Journal* 17(1): 5-21.
- Ingram, J., Holmes, K., Grabas, G., Watton, P., Potter, B., Gomer, T., Stow, N., 2004. Development of a Coastal Wetlands Database for the Great Lakes Canadian Shoreline. Final report to: The Great Lakes Commission. WETLANDS2-EPA-03. 18p.
- Kath, J., Boulton, A.J., Harrison, E.T. and Dyer, F.J., 2018. A conceptual framework for ecological responses to groundwater regime alteration (FERGRA). *Ecohydrology* 11(7): p.e2010.
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Boukalova, Z., Ertürk, A., Goldscheider, N., Ilmonen, J., Karakaya, N., Kupfersberger, H., Kværner, J. and Lundberg, A., 2011. Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends. *Environmental Science & Policy* 14(7): 770-781.
- Knights, D., Parks, K.C., Sawyer, A.H., David, C.H., Browning, T.N., Danner, K.M. and Wallace, C.D., 2017. Direct groundwater discharge and vulnerability to hidden nutrient loads along the Great Lakes coast of the United States. *Journal of Hydrology* 554: 331-341.
- Kornelsen, K.C. and Coulibaly, P., 2014. Synthesis review on groundwater discharge to surface water in the Great Lakes Basin. *Journal of Great Lakes Research* 40(2): 247-256.
- Larsen, L.G. and Woelfle-Erskine, C., 2018. Groundwater is key to salmonid persistence and recruitment in intermittent Mediterranean-climate streams. *Water Resources Research* 54(11): 8909-8930.
- Lyons, J., Zorn, T., Stewart, J., Seelbach, P., Wehrly, K. and Wang, L., 2009. Defining and characterizing coolwater streams and their fish assemblages in Michigan and Wisconsin, USA. *North American Journal of Fisheries Management* 29(4): 1130-1151.

- McKenna Jr, J.E., Reeves, H.W. and Seelbach, P.W., 2018. Measuring and evaluating ecological flows from streams to regions: Steps towards national coverage. *Freshwater Biology* 63(8): 874-890.
- Melles, S., N. Jones, and Schmidt, B., 2013. Aquatic Research Series 2013-05: Aquatic ecosystem classification for Ontario: a technical proposal. Ontario Ministry of Natural Resources. 52 pp.
- Mitsch, W.J. and Gosselink, J.G., 2015. *Wetlands, 5th Edition*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. 736p.
- Neff, B.P., Day, S.M., Piggott, A.R. and Fuller, L.M., 2005. *Base flow in the Great Lakes basin* (No. 2005-5217). US Geological Survey. 23p.
- Peralta-Maraver, I., Galloway, J., Posselt, M., Arnon, S., Reiss, J., Lewandowski, J. and Robertson, A.L., 2018. Environmental filtering and community delineation in the streambed ecotone. *Scientific reports* 8(1): 1-11.
- Perkin, J.S., Gido, K.B., Falke, J.A., Fausch, K.D., Crockett, H., Johnson, E.R. and Sanderson, J., 2017. Groundwater declines are linked to changes in Great Plains stream fish assemblages. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(28): 7373-7378.
- Persaud, E. Levison, J., MacRitchie, S., Berg, S.J., Eler, A.R., Parker, B., and Sudicky, E., 2020. Integrated modeling to assess climate change impacts on groundwater and surface water in the Great Lakes Basin using diverse climate forcing. *Journal of Hydrology* 584:124682
- Power, G., Brown, R.S. and Imhof, J.G., 1999. Groundwater and fish—insights from northern North America. *Hydrological processes* 13(3): 401-422.
- Seelbach, P.W., Wiley, M.J., Baker, M.E. and Wehrly, K.E., 2006. Initial classification of river valley segments across Michigan's lower peninsula. In *American Fisheries Society Symposium* 48: 25.
- Soares, A., et al. Under review. A global perspective on microbial diversity in the terrestrial deep subsurface.
- Uzarski, D.G., Brady, V.J., Cooper, M.J., Wilcox, D.A., Albert, D.A., Axler, R.P., Bostwick, P., Brown, T.N., Ciborowski, J.J., Danz, N.P. and Gathman, J.P., 2017. Standardized measures of coastal wetland condition: implementation at a Laurentian Great Lakes basin-wide scale. *Wetlands* 37(1): 15-32.
- Uzarski, D.G., Wilcox, D.A., Brady, V.J., Cooper, M.J., Albert, D.A., Ciborowski, J.J., Danz, N.P., Garwood, A., Gathman, J.P., Gehring, T.M. and Grabas, G.P., 2019. Leveraging a landscape-level monitoring and assessment program for developing resilient shorelines throughout the Laurentian Great Lakes. *Wetlands* 39(6): 1357-1366.

- Wehrly, K.E., Wiley, M.J. and Seelbach, P.W., 2003. Classifying regional variation in thermal regime based on stream fish community patterns. *Transactions of the American Fisheries Society* 132(1): 18-38.
- Wehrly, K.E., Wiley, M.J. and Seelbach, P.W., 2006. Influence of landscape features on summer water temperatures in lower Michigan streams. In *American Fisheries Society Symposium* 48: 113-127.
- Wilcox, D.A., Baedke, S.J. and Thompson, T.A., 2020a. A complicated groundwater flow system supporting ridge-and-swale wetlands in a Lake Michigan strandplain. *Wetlands* 40: 1481-1493.
- Wilcox, D.A., Carlson Mazur, M.L. and Thompson, T.A., 2020b. Groundwater controls on wetland vegetation of a ridge-and-swale chronosequence in a Lake Michigan embayment. *Wetlands* 40: 2425-2442.
- Zorn, T.G., Seelbach, P.W. and Wiley, M.J., 2002. Distributions of stream fishes and their relationship to stream size and hydrology in Michigan's Lower Peninsula. *Transactions of the American Fisheries Society* 131(1): 70-85.
- Zorn, T.G., Seelbach, P.W. and Wiley, M.J., 2011. Developing user-friendly habitat suitability tools from regional stream fish survey data. *North American Journal of Fisheries Management* 31(1): 41-55.

6 PRÉOCCUPATIONS RELATIVES AUX EAUX SOUTERRAINES URBAINES LIÉES À LA QUALITÉ DE L'EAU DES GRANDS LACS

Melinda Erickson¹, Steve Holysh², Brendan O'Leary³, Dale Van Stempvoort⁴,

¹U.S. Geological Survey, Mounds View, MN, USA

²Programme des eaux souterraines de la moraine d'Oak Ridges, Toronto, ON, Canada

³Wayne State University, Detroit, MI, USA

⁴Environnement et Changement climatique Canada, Burlington, ON, USA

6.1 Introduction

Ce chapitre est un complément et une mise à jour du chapitre 6 du précédent rapport « État des connaissances scientifiques » de l'Annexe sur les eaux souterraines intitulé « Répercussions du développement urbain sur les eaux souterraines » (K. Warner et al., 2016). Le principal objectif de ce chapitre est de réexaminer les besoins scientifiques prioritaires identifiés dans ce chapitre (tableau 6.1) et d'identifier tout nouveau développement lié à ces besoins scientifiques, sur la base de nouvelles recherches publiées dans des revues scientifiques, ou sur la base d'initiatives/programmes entrepris par des agences de gestion de l'eau. Le second objectif est d'identifier tout autre besoin scientifique prioritaire qui, soit n'a pas été mentionné dans le rapport de 2016, soit est apparu comme une nouvelle priorité depuis ce rapport.

Tableau 6.1 Besoins scientifiques prioritaires identifiés dans le rapport de 2016 (Warner et al., 2016)

Besoins scientifiques prioritaires	Besoins connexes et lacunes en matière d'information
6A. Collecte et analyse des données aux fins de gestion des ressources en eau souterraine urbaine	<ul style="list-style-type: none">● Comptabilisation de l'utilisation de l'eau.● Meilleure utilisation des outils de modélisation des eaux souterraines urbaines.
6B. Renseignements quantitatifs sur les sources de contaminants	<ul style="list-style-type: none">● Vérifications sur les produits chimiques, acquisition de données de base et surveillance.

Besoins scientifiques prioritaires	Besoins connexes et lacunes en matière d'information
	<ul style="list-style-type: none"> ● Renseignements quantitatifs fiables sur les rejets des fosses septiques et les fuites des canalisations d'égout.
6C. Surveillance de la qualité de l'eau souterraine et évaluation des risques potentiels pour la santé	<ul style="list-style-type: none"> ● Meilleure compréhension de l'exposition humaine aux eaux souterraines dégradées ainsi qu'aux maladies et aux risques potentiels pour la santé.
6D. Acquisition de données de base et surveillance des bilans hydrologiques urbains	<ul style="list-style-type: none"> ● Données sur les taux d'exfiltration et d'infiltration des égouts, les taux de fuites des réseaux d'approvisionnement en eau, les estimations de recharge excessive en raison de l'infiltration des eaux de ruissellement.
6E. Recherches sur le déplacement des eaux souterraines urbaines et le devenir des contaminants	<ul style="list-style-type: none"> ● Connaissances liées au « karst urbain ». ● Gestion des données (utilisation d'un système d'analyse des renseignements), regroupement de renseignements concernant l'infrastructure de subsurface. ● Connaissances – Recherches concernant les menaces potentielles de l'eau souterraine urbaine dégradée sur les habitats aquatiques.
6F. Surveillance et recherches sur la gestion des eaux de ruissellement et l'assèchement	<ul style="list-style-type: none"> ● Connaissances et surveillance liées aux rejets d'eaux de ruissellement, y compris sur l'infrastructure « verte ». ● Surveillance et gestion de l'assèchement.

La gestion de l'eau a été mentionnée deux fois dans la liste des besoins scientifiques prioritaires que Warner et al. (2016) ont dressée (tableau 6.1), plus précisément la gestion des eaux souterraines (6A) et des eaux de ruissellement (6F). Cette mise en avant était appropriée étant donné que les villes sont des lieux où les besoins en matière de gestion de l'eau sont particulièrement évidents et où les ressources dédiées à la gestion de l'eau ont tendance à être fortement concentrées. La gestion de l'eau en milieu urbain est largement basée sur la science et l'ingénierie, il devient donc naturellement prioritaire d'identifier les lacunes scientifiques directement liées aux pratiques et aux approches de gestion de l'eau et de répondre à ces besoins par de nouvelles recherches.

Dans les zones urbaines, la gestion de l'eau est particulièrement difficile en raison des interactions complexes entre les différentes composantes du cycle hydrologique en milieu urbain, notamment les précipitations, les eaux souterraines, les eaux de surface et les eaux

de ruissellement. Dans les zones urbaines, le cycle hydrologique a été modifié par des infrastructures en surface et au sol (bâtiments, surfaces pavées, etc.) et des infrastructures souterraines (fondations, tunnels, égouts de ruissellement et sanitaires, conduites principales), comme l'illustrent les figures 6.1 et 6.2. En ce qui concerne la qualité de l'eau des Grands Lacs, la gestion des eaux urbaines, y compris les eaux souterraines, est particulièrement importante parce que les villes sont des zones concentrées et densément peuplées (figure 6.3) où divers facteurs de stress anthropiques affectant la quantité et la qualité de l'eau sont particulièrement importants (tableau 6.2); ce qui met en évidence les besoins scientifiques connexes. Par exemple, la plupart des secteurs préoccupants identifiés dans le cadre de l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs se trouvent dans des zones urbaines ou à proximité. Certaines des plus grandes villes du bassin des Grands Lacs (BGL) sont situées sur les rives des Grands Lacs (figure 6.3) où les eaux souterraines se déversent directement dans les zones riveraines et s'entremêlent. Dans d'autres villes du bassin, les eaux souterraines peuvent affecter indirectement la qualité de l'eau des Grands Lacs, notamment en se déversant dans les cours d'eau urbains qui se jettent dans les Grands Lacs.

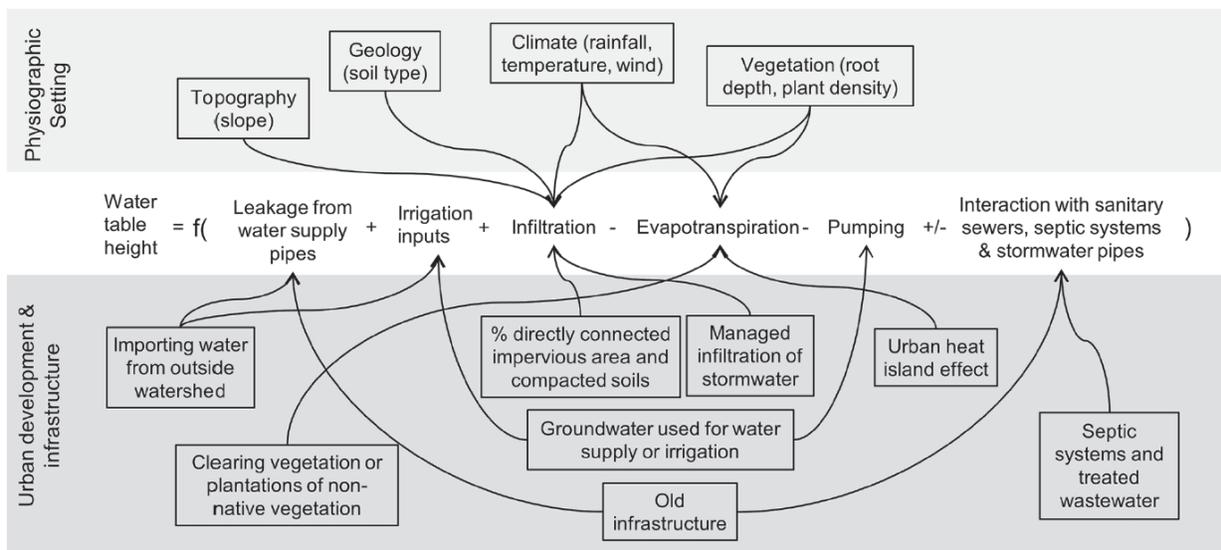


Figure 6.1 Cycle hydrologique urbain (tirée de Bhaskar et al., 2016).

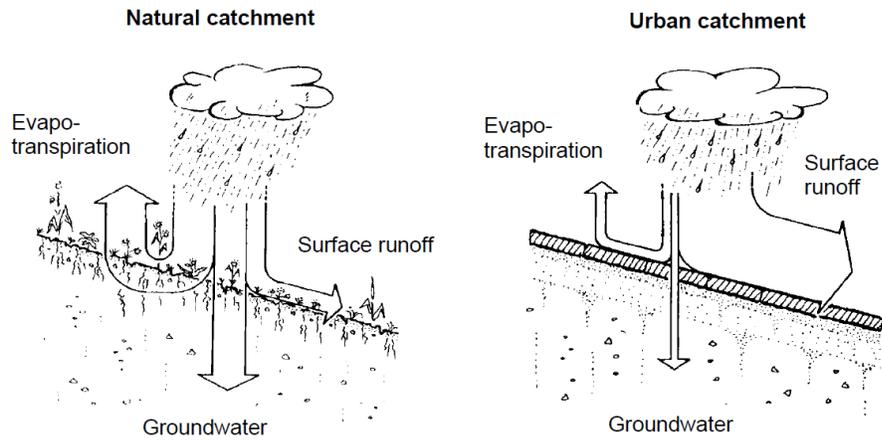


Figure 6.2 Illustration des modifications du bilan hydrologique liées à l'urbanisation (tirée de Sokac, 2019).

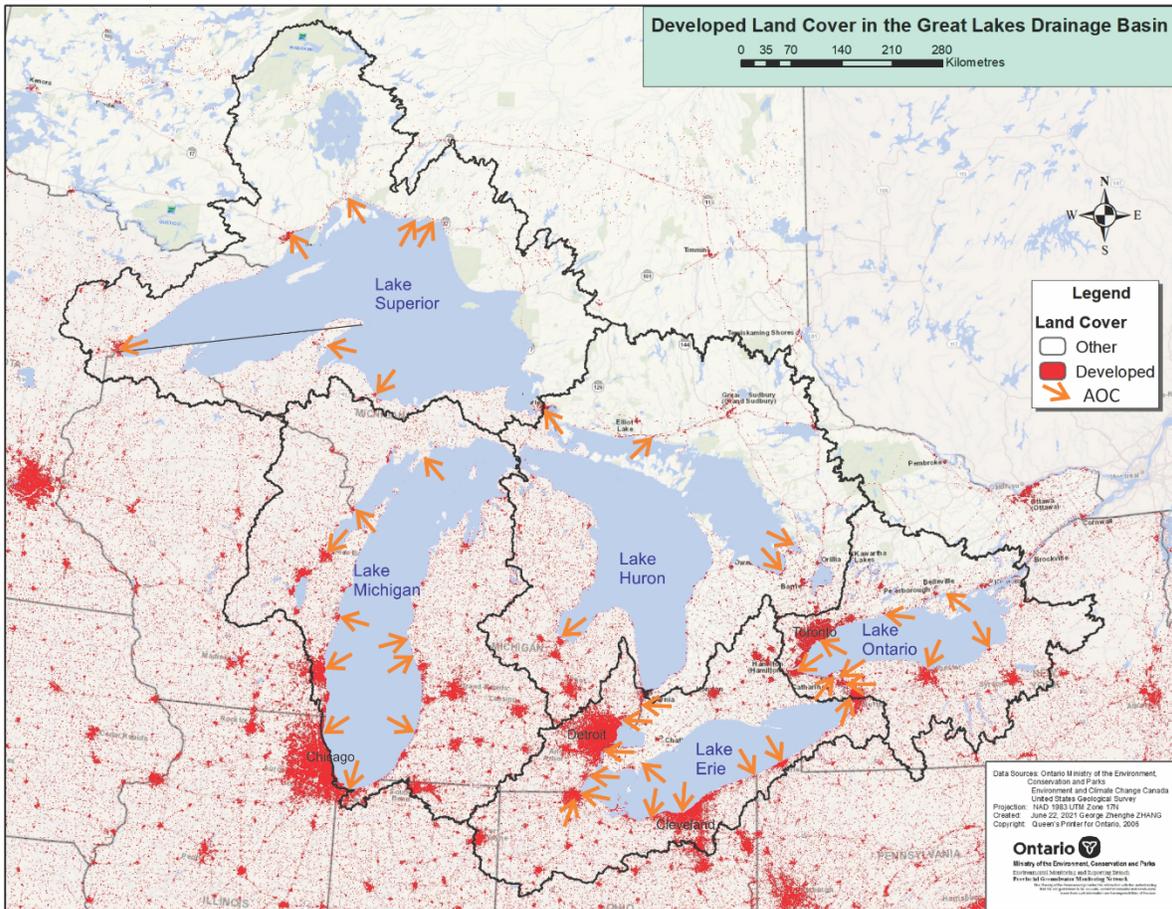


Figure 6.3 Zones développées dans le bassin des Grands Lacs (en grande partie urbaines). Il est à noter que de nombreux secteurs préoccupants (SP) se trouvent dans les zones développées.

Tableau 6.2 Exemples de facteurs de stress liés aux eaux souterraines qui ont tendance à être amplifiés dans les zones urbaines*.

Cycle hydrologique perturbé par des modifications de flux d'eau : irrigation, fuites d'égouts, fuites de conduites d'eau, surfaces imperméables, galeries d'infiltration, assèchement, etc.

Charge relativement élevée de contaminants dans les eaux souterraines, comme l'utilisation de sel de voirie, les sites industriels, les déversements et les fuites provenant de diverses sources (Warner *et al.*, 2016).

Charge relativement élevée d'éléments nutritifs par des fuites d'égouts, des engrais, etc.

Les écosystèmes / habitats aquatiques (cours d'eau, milieux humides, rives des lacs) sont fortement perturbés / modifiés et parfois complètement changés ou même supprimés dans les zones urbaines.

Altération des températures des cours d'eau en raison des changements/perturbations du cycle hydrologique et par la pollution thermique (chauffage des eaux souterraines par les systèmes géothermiques, suppression de la couverture végétale des cours d'eau et autres sources).

* surtout par rapport aux zones non développées, certains d'entre eux sont également amplifiés dans les zones rurales (p. ex. l'irrigation, la charge en éléments nutritifs)

6.2 Mise à jour de l'état des besoins scientifiques prioritaires

Un thème commun aux études récentes sur l'hydrologie urbaine est la façon dont les eaux urbaines, notamment les eaux souterraines, sont affectées par les divers composants de l'infrastructure urbaine; surfaces pavées, conduites d'eau, égouts, bâtiments, tunnels, systèmes d'eaux de ruissellement, etc. (p. ex. figures 6.1 et 6.2). Dans le contexte de l'hydrologie urbaine, les études récentes ont souvent souligné les relations interactives entre les eaux souterraines urbaines, les égouts sanitaires et les systèmes d'eaux de ruissellement. Ces relations sont entrelacées et pertinentes pour les six besoins scientifiques prioritaires identifiés dans le tableau 6.1 (6A à 6F). Bien qu'il ne soit pas identifié comme un besoin scientifique prioritaire distinct ou nouveau, nous fournissons dans les sections 2.1 et 2.2 une mise à jour (développements scientifiques postérieurs à 2016 : recherches, politiques, etc.) sur ce thème chevauchant de l'infrastructure des eaux souterraines urbaines. Bien que les sections 2.1 et 2.2 rendent compte des nouveaux développements qui abordent de nombreux besoins scientifiques prioritaires identifiés précédemment, Il est important de noter que d'autres développements scientifiques spécifiquement liés aux besoins scientifiques 6A à 6E identifiés précédemment (du tableau 6.1) sont ensuite présentés dans la section 2.3. Le besoin scientifique 6F (« Surveillance et

recherches sur la gestion des eaux ruissellement et l'assèchement ») est entièrement couvert dans les sections thématiques suivantes qui se chevauchent.

6.2.1 Lacunes dans la compréhension des liens entre les eaux souterraines et les infrastructures

Des publications récentes témoignent d'une prise de conscience mondiale croissante de la nécessité de mieux comprendre les eaux souterraines urbaines. Certains de ces facteurs sont : (i) l'utilisation accrue des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement, qui ont un impact sur les eaux souterraines urbaines (Bhaskar et al., 2018; Bonneau et al., 2017; Pinasseau et al., 2020); (ii) la sensibilisation croissante sur le besoin de comprendre les eaux souterraines urbaines afin de prendre des décisions appropriées en matière de projets d'infrastructure souterraine (Attard, Rossier et Eisenlohr, 2016; Attard, Rossier, Winiarski et al., 2016); (iii) les besoins de comprendre les problèmes chroniques ou émergents tels que l'inondation des sous-sols à l'échelle régionale (Shepley et al., 2020).

Mises à jour scientifiques relatives aux répercussions de l'urbanisation sur les budgets de l'eau et le cycle hydrologique

Un examen de la littérature internationale a fourni un résumé de nombreuses répercussions urbaines sur le cycle hydrologique (McGrane, 2016). Plus précisément, l'auteur a noté des études quantifiant à la fois les augmentations et les diminutions de l'infiltration dues aux infrastructures vertes et aux surfaces imperméables. Il a également noté la quantification de l'infiltration et de l'exfiltration des réseaux d'égouts pouvant modifier le débit des égouts de plus de 50 %. L'étendue spatiale, l'âge et l'intégrité de l'infrastructure d'égout sont les principaux facteurs qui déterminent le degré d'échange/écoulement souterrain vers/depuis les égouts (McGrane, 2016).

Des recherches récentes montrent le rôle dominant des eaux souterraines relativement peu profondes et jeunes contribuant au débit de base dans les cours d'eau (Berghuijs et Kirchner, 2017; Jasechko et al., 2016), notamment dans les cours d'eau urbains (Grande et al., 2020). Cette tendance peut être amplifiée dans la subsurface des environnements urbains, étant donné la présence de réseaux complexes de drains, de canalisations et de tunnels qui fournissent de grands canaux perméables (communément appelés « karst urbain »), ce qui améliore l'écoulement latéral et peu profond des eaux souterraines (Shepley et al., 2020; Warner et al., 2016). À l'appui de ce concept et en utilisant les données $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau, Bonneau et al. (2018) ont trouvé des preuves indiquant que les eaux souterraines se déversant dans les cours d'eau d'un bassin versant urbain avaient un temps de séjour plus court dans la subsurface par rapport aux eaux souterraines se déversant dans les cours d'eau du bassin versant forestier adjacent. De même, dans une étude d'un bassin versant urbain dans le BGL (New York), Slosson et al. (2021) ont trouvé des preuves indiquant que l'augmentation de la couverture de surface « imperméable » et le « débranchement » des couloirs de cours d'eau des eaux souterraines riveraines par la construction de « berges canalisées et renforcées » ont entraîné une livraison de charges de chlorure plus proches des taux d'application de sel de déglacage, et 50 % plus élevées par rapport aux charges dans les tronçons « intacts ».

Dans une étude récente, Bonneau et al. (2017) ont noté que, malgré certains progrès récents, il existe peu d'information sur la façon dont l'eau infiltrée se déplace le long des voies karstiques urbaines de subsurface. Dans une étude menée à Mississauga, en Ontario (près de Toronto), Shepley et al. (2020) ont constaté que le dépôt de till superficiel agit comme un aquitard, limitant l'écoulement des eaux souterraines peu profondes et l'exfiltration du réseau d'égouts pluviaux vers le remplissage perméable des tranchées des services publics. Cet effet karstique urbain sévère a entraîné un écoulement involontaire des tranchées d'égouts pluviaux « surchargées » vers les systèmes collecteurs de drainage des fondations, ce qui a provoqué une inondation généralisée des sous-sols. En revanche, (Attard, Rossier et Eisenlohr, 2016; Attard, Rossier, Winiarski et al., 2016) ont observé que d'autres structures installées dans des environnements urbains souterrains (p. ex. les fondations) n'améliorent pas l'écoulement des eaux souterraines, mais ont l'effet inverse, agissant comme des barrières hydrauliques. Un message à retenir de ces études est qu'en plus de la complexité naturelle de l'environnement souterrain, les éléments anthropiques ajoutent une complexité supplémentaire. Par conséquent, les leçons tirées de la recherche dans une zone urbaine du BGL peuvent ne pas s'appliquer facilement à d'autres zones urbaines présentant des conditions de subsurface différentes. Par conséquent, il est nécessaire de mener des études et de collecter des données de subsurface localisées dans chaque zone urbaine.

Plusieurs études internationales ont quantifié les flux souterrains dans les villes (tableau 6.3). Par exemple, à Bruxelles, en Belgique, une étude a utilisé une analyse d'exploration de données des modèles d'infiltration dans les égouts pour déterminer les caractéristiques saisonnières des infiltrations d'eau dans les égouts principaux, ainsi que les améliorations d'infiltrations après les réparations des égouts (de Ville et al., 2017). Une étude de cas à Hué, au Vietnam, a élaboré un bilan hydrique pour quantifier les effets d'exfiltration et d'infiltration sur le débit et la qualité des eaux usées. Elle a permis de découvrir des débits substantiels et des différences saisonnières importantes (Watanabe & Harada, 2019). La ville de Pezinok, en Slovaquie, une petite zone urbaine, a été utilisée pour une étude de cas visant à quantifier un bilan hydrique complet, notamment des données détaillées pour l'infiltration et l'exfiltration associées à la fois aux conduites d'approvisionnement en eau et aux égouts vers et depuis les eaux souterraines (Sokac, 2019). Enfin, une étude sur une période de 40 ans de changements d'utilisation des terres à Perth, en Australie, a été utilisée pour quantifier l'impact hydrologique de l'urbanisation avec une infiltration importante des eaux de ruissellement, en utilisant des observations du niveau des eaux souterraines d'un bassin versant urbain (Locatelli et al., 2017).

Tableau 6.3 Études du cycle hydrologique urbain à l'extérieur du bassin des Grands Lacs.

Mesure ou modélisation du cycle hydrologique urbain	Lieu de l'étude	Référence
Répercussions du mode de développement sur le régime d'écoulement des eaux souterraines urbaines.	Comté de Baltimore, Maryland, États-Unis	(Barnes <i>et al.</i> , 2018)
Une montée ou une descente? Gérer les effets complexes de l'urbanisation sur le débit de base.	Perth, Australie occidentale; Baltimore, Maryland, États-Unis	(Bhaskar, Beesley, <i>et al.</i> , 2016)
Évaluation de la gestion des eaux de ruissellement par infiltration pour restaurer les processus hydrologiques dans les cours d'eau d'amont urbains.	Maryland, États-Unis	(Fanelli <i>et al.</i> , 2017)
Modélisation physique des fuites de canalisations d'eaux de ruissellement dans un bassin versant urbain.	Une ville du nord de l'Allemagne	(Peche <i>et al.</i> , 2019) (Peche <i>et al.</i> , 2019)
Utilisation de mesures basées sur la télédétection pour quantifier la réponse hydrologique d'une ville.	Région de Bruxelles-Capitale, Belgique	(Wirion <i>et al.</i> , 2019)

Une étude antérieure à Bâle, en Suisse (Epting *et al.*, 2008), s'est appuyée sur une modélisation complète dans un cadre urbain pour évaluer et atténuer les répercussions potentielles de la construction de tunnels routiers sur le régime d'écoulement des eaux souterraines, à la fois à court terme (p. ex. l'assèchement de la construction) et à plus long terme (p. ex. la mise en place d'installations de subsurface imperméables; murs de coupure, tunnels, etc. conduisant à des déviations à long terme de l'écoulement des eaux souterraines). Les eaux souterraines étant utilisées par de nombreuses industries, les données urbaines existantes disponibles ont été complétées par des puits de surveillance et des essais de pompage liés à la construction afin de paramétrer le modèle. L'étude a démontré l'utilisation réussie de la modélisation numérique dans un cadre urbain complexe, spatialement et temporellement variable, pour orienter les activités de construction dans des directions spécifiques afin de minimiser les répercussions négatives de la construction sur les ressources en eaux souterraines.

Mises à jour scientifiques liées aux eaux souterraines et aux égouts

Des études récentes sur le lien entre les eaux souterraines urbaines et les égouts sont particulièrement pertinentes pour les villes des Grands Lacs étant donné que la plupart des réseaux d'égouts sont anciens et sujets à d'importantes fuites. Par exemple, le bulletin d'infrastructure 2017 de l'American Society of Civil Engineers (ASCE) indique que les infrastructures d'eaux usées (p. ex les canalisations d'égout) sont vieillissantes, en mauvais état et présentent des fuites. Un rapport sur les exfiltrations réalisé en 1989 par l'EPA a montré une perte de débit de 30 à 50 %; à une époque où l'ASCE classait l'infrastructure des égouts dans la catégorie « C » (médiocre). En 2017, la note de l'infrastructure d'égouts a été ramenée à « D+ » (mauvais) par l'ASCE; indiquant des taux d'exfiltration probablement plus élevés. Les notes des eaux usées pour les États des Grands Lacs en particulier allaient de C à D- (American Society of Civil Engineers, 2017).

Plusieurs études de terrain récentes ont documenté une infiltration substantielle des eaux souterraines dans les égouts sanitaires, unitaires ou pluviaux (tableau 6.4). Une approche fondée sur la surveillance détaillée de diverses composantes du cycle hydrologique en milieu urbain, notamment les débits des égouts, les précipitations et les niveaux des eaux souterraines, a récemment été appliquée au Danemark (Thorndahl et al., 2016). D'autres ont utilisé des traceurs, de la silice dissoute (Maguire & Fulweiler, 2016), de l'édulcorant artificiel acésulfame ou de la composition isotopique stable ($\delta^{18}\text{O}$) de l'eau (Penckwitt et al., 2016), pour sonder l'afflux d'eaux souterraines vers les égouts pluviaux ou les égouts unitaires. De manière cohérente, ces études ont trouvé des preuves de taux importants d'infiltration d'eau souterraine dans les égouts. Certains auteurs en ont déduit que des fractions importantes de l'eau dans les égouts provenaient des eaux souterraines (tableau 6.4).

Tableau 6.4 Synthèse des études récentes sur l'infiltration des eaux souterraines dans les égouts urbains.

Objet de l'étude	Type d'égout *	Fraction présumée des eaux souterraines	Lieu	Référence
La silice dissoute comme traceur d'infiltration des eaux souterraines	EEGEP	39 %	Boston, MA	(Maguire & Fulweiler, 2016)
Mesures du débit, modélisation de l'infiltration des eaux souterraines	ES, EEGEP	Moyenne de 23 à 48 %.	Danemark	(Thorndahl et al., 2016)
Isotope stable ($\delta^{18}\text{O}$) de l'eau comme traceur d'infiltration des eaux souterraines	ES	Jusqu'à 41%	Allemagne	(Penckwitt et al., 2016)

Objet de l'étude	Type d'égout *	Fraction présumée des eaux souterraines	Lieu	Référence
Mesures du débit qui ont démontré une infiltration des eaux souterraines	EEGEP		Detroit, MI	(Hoard et al., 2020)
Dilution de l'édulcorant artificiel acésulfame comme traceur d'infiltration des eaux souterraines	ES		Chine	(Zhao et al., 2020)

*EEGEP = Ensemble d'égouts sanitaires/pluviaux, ES = égout sanitaire, EP = égout pluvial

Hoard et al. (2020) ont découvert d'importants transferts d'eau dans le cadre d'une étude de surveillance d'un cycle complet hydrologique dans un petit bassin d'égout de Détroit, au Michigan. Ils ont présumé un écoulement des eaux souterraines dans un système d'égouts combinés non étanche sur la base d'une surveillance détaillée des débits des égouts, des précipitations et des niveaux des eaux souterraines. Ils ont constaté que la surveillance du cycle complet hydrologique en milieu urbain (toutes les entrées et sorties de surface et de subsurface) est essentielle pour comprendre comment les mesures de contrôle des eaux de ruissellement influencent les flux vers les eaux réceptrices. Par exemple, leur étude a montré que la modification d'entreposage des eaux souterraines peut jouer un rôle majeur dans l'augmentation du débit par temps sec dans les canalisations d'égout, en raison du niveau élevé des nappes phréatiques par rapport à l'altitude de ces canalisations, permettant une quantité importante d'infiltration et d'exfiltration. Les écoulements à l'intérieur de l'égout indiquent un échange d'eau inattendu entre l'égout fuyant et le système d'eaux souterraines; des voies de passage à travers des infrastructures résidentielles abandonnées ou défailtantes, ou une combinaison des deux.

La compréhension de la position de l'infrastructure d'égout par rapport aux eaux souterraines saturées est également essentielle pour élucider les parties du réseau d'égout qui pourraient perdre de l'eau vers le système d'eau souterraine (c'est-à-dire les parties situées au-dessus de la nappe phréatique). Les égouts situés en dessous de la nappe phréatique peuvent gagner en volume grâce à l'infiltration d'eau souterraine dans le système, ce qui augmente les volumes et les coûts de traitement des eaux usées (la municipalité régional de York, 2020). Les résultats d'une étude menée à Buffalo, dans l'État de New York, indiquent que les terrains vacants de la ville peuvent, de manière cumulative, infiltrer 51 à 54 % de volume supplémentaire de précipitations annuelles par rapport à l'état antérieur à la démolition. Ces résultats montrent que les terrains vacants, en tant que paysages utiles, peuvent réduire les flux d'eau dans les infrastructures d'eaux usées vieillissantes en augmentant la recharge des eaux souterraines (Kelleher et al., 2020).

Alors que l'attention récente sur les liens entre les eaux souterraines et les égouts s'est souvent concentrée sur l'infiltration des eaux souterraines dans les égouts (ci-dessus),

certaines études récentes ont sondé le processus inverse, l'exfiltration (fuite) des égouts vers les eaux souterraines. Le processus d'exfiltration est particulièrement pertinent pour le mandat lié aux contaminants de ce chapitre, consistant à sonder le lien entre les eaux souterraines urbaines et la qualité de l'eau des Grands Lacs.

Des examens opportuns ont été fournis sur la modélisation de l'exfiltration des égouts vers les eaux souterraines urbaines (Nguyen et al. (2021) et la prédiction de l'état des canalisations d'égouts (Mohammadi et al., 2018). Particulièrement pertinents pour ce rapport, Nguyen et al. (2021) ont identifié les besoins de recherche suivants : (a) une meilleure compréhension des « processus fondamentaux » d'exfiltration des égouts à l'échelle de la canalisation et des « processus de transport et de transformation » des fuites d'égouts dans les unités géologiques de subsurface; (b) la nécessité de faire progresser la modélisation du devenir et du comportement d'un large éventail de contaminants dérivés des égouts dans les eaux souterraines; et (c) les défis liés à la mise à l'échelle des modèles de l'échelle de la canalisation/locale à l'échelle de la ville ou du réseau d'égouts. Des études antérieures d'exfiltration des égouts (Reynolds et Barrett, 2003; M. Rutsch et al., 2008; Mandy Rutsch et al., 2006) fournissent un contexte utile, tout comme d'autres résumés plus récents d'informations pertinentes (Ali et Choi, 2019; Lauwo et al., 2012; Raney, 2020).

Diverses publications postérieures à 2016 ont fait état de nouvelles méthodes pour mesurer ou modéliser l'exfiltration des égouts. La plupart des études ont été menées en dehors du bassin des Grands Lacs (tableau 6.5). Dans une étude de modélisation, Peche et al. (2019) ont démontré que les défauts des égouts sanitaires peuvent entraîner des fuites importantes selon les conditions locales; soit une infiltration des eaux souterraines dans les égouts ou une exfiltration des eaux usées vers les eaux souterraines. Des chercheurs californiens ont élaboré un modèle de probabilité d'exfiltration des égouts basé sur les attributs des tuyaux d'égout et l'élévation des eaux souterraines (Lee et al., 2015; Roehrdanz et al., 2017). Ils ont constaté que ce modèle pouvait prédire l'occurrence probable de divers indicateurs d'eaux usées (tableau 6.5) dans les eaux souterraines urbaines peu profondes sous-jacentes. Les concentrations d'indicateurs dans les eaux souterraines étaient généralement inférieures à 1 % des concentrations des eaux usées (Lee et al., 2015), ce qui suggère des fractions similaires de contribution des eaux usées aux eaux souterraines. Shepley et al. (2020) ont utilisé des puits de surveillance et le traçage de colorants pour sonder le flux des égouts pluviaux vers les eaux souterraines. Ishii et al. (2021) ont signalé que l'édulcorant artificiel acésulfame était un excellent traceur pour évaluer l'exfiltration des égouts vers les eaux souterraines. Des analyses de traceurs dans les eaux souterraines d'une ville d'Ukraine (Vystavna et al., 2018) ont montré que l'impact des fuites d'égouts était très variable d'un site à l'autre; les eaux usées contribuant jusqu'à 29 % des eaux souterraines. Plus particulièrement, 7 des 17 échantillons ont indiqué une contribution de 13 % des eaux usées aux eaux souterraines. Les résultats d'une étude en Allemagne (Nguyen et Venohr, 2021) ont estimé un taux d'exfiltration moyen d'environ 1 mm par mètre de tuyau d'égout par an; avec des taux d'exfiltration plus élevés dans les régions avec des égouts plus anciens (> 40 ans). Ils ont estimé que l'exfiltration des égouts représentait 9,8 % et 17,2 % des charges de nitrates et de phosphates des systèmes urbains émises dans l'environnement, et que ces fractions augmenteraient avec le vieillissement des égouts.

Tableau 6.5 Études sur l'exfiltration des égouts sanitaires vers les eaux souterraines.

Méthode de traçage/quantification/évaluation des fuites d'égouts	Lieu de l'étude	Référence
Traceurs chimiques des fuites d'égouts vers les eaux souterraines : édulcorants artificiels, fluorescent de type tryptophane, bisphénol A, autres composés organiques, matière organique dissoute, nitrate, isotope stable de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$).	Californie	(Lee et al., 2015; Roehrdanz et al., 2017)
Traceurs (isotopes stables de l'eau, chlorure) pour estimer les taux de fuite de l'eau du robinet et des eaux usées municipales vers les eaux souterraines.	Ukraine	(Vystavna et al., 2018)
Traceur chimique de fuites d'égouts vers les eaux souterraines : l'édulcorant artificiel acésulfame	Japon	(Ishii et al., 2021)
Une approche d'évaluation intégrée pour prévenir le risque d'exfiltration des égouts	Edmonton, Canada	(Kaddouraa & Zayed, 2018)
Modélisation physique des fuites de canalisations d'eaux pluviales dans un bassin versant urbain	Allemagne	(Peche et al., 2019) (Peche et al., 2019)
Évaluation de la pollution par les éléments nutritifs des systèmes urbains, y compris l'exfiltration des égouts.	Allemagne	(Nguyen and Venohr, 2021)
Examen de la modélisation de l'exfiltration dans les égouts		(Nguyen et al., 2021)

Développements récents de politiques/programmes pertinents dans le BGL concernant les liens entre les eaux souterraines et les égouts.

In their “Guide for Estimating Infiltration and Inflow”, the US EPA (2014) defined three major son « Guide for Estimating Infiltration and Inflow » (Guide pour estimer les infiltrations et les débits d'eau), l’EPA des États-Unis (2014) a défini trois composantes majeures du débit des eaux usées dans un réseau d'égouts sanitaires : « le débit sanitaire (ou eaux usées) de base, l'infiltration des eaux souterraines et l'infiltration dérivée des précipitations, plus communément appelée débit entrant » (EPA des États-Unis, 2014). Diverses municipalités de l'Ontario ont récemment élaboré des politiques et des programmes visant à réduire l'infiltration des eaux souterraines et le débit entrant (eau de pluie et fonte des neiges) dans les égouts sanitaires (p. ex. la municipalité régionale de York, 2020). Ils ont également soutenu les efforts visant à développer des « pratiques exemplaires » pour gérer cette infiltration et afflux (Kesik, 2015). Ces programmes ont donné lieu à diverses activités,

comme la réhabilitation et le remplacement des égouts et des raccordements d'égouts, ainsi que le débranchement des tuyaux de descente, des tuiles suintantes, des pompes de puisard et d'autres structures des égouts sanitaires, ainsi que l'établissement d'une surveillance localisée (micro-bassin) pour soutenir ces efforts de réduction des infiltrations (p. ex. la municipalité régionale de York, 2020).

Dans le cadre de cet examen, aucune information n'a été trouvée sur les développements récents (après 2016) en matière de politiques, de pratiques et de programmes par les différents niveaux de gouvernement (y compris les municipalités) dans le BGL directement liés à la quantification des fuites des égouts sanitaires municipaux ou à la quantification des flux de contaminants provenant de sources urbaines, comme les eaux pluviales et les fuites d'égouts, vers les eaux souterraines. Les fuites d'égouts sont plutôt traitées au cas par cas lorsqu'elles sont découvertes.

Divers paliers de gouvernement dans le BGL fournissent des « directives » ou des « normes » sur les essais d'étanchéité des égouts (p. ex. Michigan Department of Transportation, 2020; ministère de l'Environnement de l'Ontario, 2008; Pennsylvania Department of Environmental Protection, 2017; Wong et Kerkez, 2018). Cependant, les tests décrits dans ces documents de directives sont destinés à la détection ponctuelle de fuites et non à la quantification des taux continus d'exfiltration des égouts vers les eaux souterraines. Par conséquent, il semble qu'il n'existe pas de données gouvernementales sur les taux de fuite d'égouts dans le BGL, que ce soit pour les systèmes existants plus anciens ou pour les systèmes nouvellement construits. En outre, il ne semble pas non plus qu'il y ait eu de récents développements politiques liés à la quantification de la fréquence ou du risque d'exfiltration des égouts sanitaires, ou à l'examen des facteurs contribuant à l'exfiltration.

Répercussions des risques sanitaires associés à la qualité des eaux souterraines

d'augmentation des niveaux de substances toxiques et de pollution microbienne dans les eaux souterraines urbaines (Nguyen et al., 2021). Plus particulièrement, les modifications urbaines de la zone proche de la surface ont un impact sur les voies d'exposition aux contaminants en raccourcissant potentiellement les distances de déplacement et les temps de rétention hydraulique dans les eaux souterraines peu profondes (Voisin et al., 2018; Zhang & Chui, 2019). Les réseaux de canalisations régionaux, qui sont considérés comme des infrastructures sanitaires essentielles (Clarke et al., 2017), constituent la principale méthode de transport de l'eau dans les centres urbains du BGL. L'échange d'eaux souterraines et d'eaux d'égout le long des couloirs d'égouts présente des risques chimiques et biologiques (Peché et al., 2017, 2019). En raison de la présence de tuyaux d'égout et du remplissage de la subsurface, une évaluation des changements hydrologiques à faible profondeur devient essentielle pour déterminer le risque de polluants de subsurface (McGrane, 2016). Une meilleure compréhension des fluctuations de la nappe phréatique à faible profondeur est un moyen pratique de déduire les modèles d'écoulement de subsurface et contribuera à la compréhension du déplacement des polluants de subsurface (Yang et al., 2018).

Les canalisations d'égout urbaines représentent une voie d'exposition pour l'intrusion de vapeur dans les bâtiments qui est souvent négligée dans les modèles conceptuels de site d'intrusion de vapeur (Eklund et al., 2012; Ma et al., 2020; McHugh et al., 2017). En plus du transport de vapeur directement à travers l'espace d'une canalisation, McHugh et al. (2017) ont noté que les tuyaux d'égout qui fuient le long des sous-sols ou des sous-planchers peuvent véhiculer des vapeurs sur toute la longueur des conduits. En raison du risque de transport de vapeur dans l'espace d'une canalisation ou à travers le matériau de remplissage entourant les canalisations, les canalisations d'égout qui croisent les eaux souterraines présentent un risque d'intrusion de vapeur plus élevé. Le test de vapeur d'égout est recommandé dans le cadre du modèle conceptuel du site à ces endroits à plus haut risque. Par conséquent, la proximité de la nappe phréatique à une canalisation d'égout est une variable clé dans la hiérarchisation du risque d'intrusion de vapeur.

6.2.2 Eau souterraine et les liens avec une infrastructure verte

Recherches sur la gestion des eaux pluviales et les infrastructures vertes

Dans le bassin versant des Grands Lacs, la zone urbaine de Cleveland, dans l'Ohio, a été une région active dans la recherche sur l'infrastructure verte pour la gestion des eaux pluviales (IVGEP). Plusieurs études récentes font état des résultats obtenus dans le bassin versant de West Creek, un affluent de la rivière Cuyahoga, qui se déverse dans le lac Érié. Une étude a rapporté que l'IVGEP a entraîné une augmentation de l'infiltration de 7,6 %, sur la base de mesures et d'un modèle du cycle hydrologique (Avellaneda et al., 2017). Une autre étude a documenté le fait que les pics de débit d'orage et le débit total peuvent être réduits par certains types de rénovation de rues avec une infrastructure verte favorisant l'infiltration des eaux pluviales (Jarden et al., 2016). Les mesures de contrôle qui infiltrent les eaux pluviales, comme les jardins de pluie, entraînent une augmentation du débit de base des cours d'eau et une diminution du ruissellement (Avellaneda et Jefferson, 2020). Deux jardins de pluie étudiés de manière intensive ont montré une infiltration et une évapotranspiration substantielles des eaux pluviales (Shuster & Darner, 2018). L'efficacité d'un modèle de bilan hydrologique dans un environnement urbain (DRAINMOD-Urban) a également été testée, et les résultats illustrent des conditions hydrologiques dans lesquelles le modèle fonctionne et ne fonctionne pas bien (Lisenbee et al., 2020). La surveillance du cycle hydrologique complet et un modèle de cellule de biorétention non munie ont été utilisés pour quantifier le « recouplage » de l'hydrologie de surface et de subsurface (Stewart et al., 2017). Une étude des cellules de biorétention a permis de quantifier la réduction du ruissellement et l'augmentation de l'infiltration et de l'évapotranspiration (Winston et al., 2016).

Une étude portant sur un revêtement perméable et un système souterrain de collecte des eaux pluviales à Huron, dans l'Ohio, a montré une diminution importante du volume des eaux pluviales de pointe et du débit de pointe (Winston et al., 2020). La performance des pratiques de développement à faible impact, plus précisément le pavage perméable et drain souterrain, a été évaluée à l'aide de mesures et de modèles pour un site en Ontario (Canada) et un site dans le comté de Kitsap, dans l'État de Washington. Les fluctuations

mesurables de la surface hydrostatique et le débit du drain souterrain ont découlé d'événements pluvieux, ainsi que des liens entre l'ampleur des précipitations et la nappe phréatique; et les débits attendus ont été développées (Zhang & Chui, 2018) (les liens entre les précipitations, la fluctuation de la nappe phréatique et les débits du drain souterrain ont varié avec la technique d'analyse statistique).

Le tableau 6.6 donne quelques exemples d'études sur les IVGEP réalisées à l'extérieur du BGL, et certains sont résumés ici. Une étude sur la performance des revêtements perméables près de Montréal, au Canada, a montré des retards importants des débits de pointe et des réductions du ruissellement (Vaillancourt et al., 2019). Un document de synthèse sur la gestion des eaux pluviales a noté que les études ont tendance à se concentrer sur les débits de pointe et les volumes d'écoulement, mais que les composantes des eaux souterraines (débit de base et recharge) reçoivent moins d'attention et de quantification (Jefferson et al., 2017). L'effet de l'infiltration des eaux pluviales à plusieurs échelles a été examiné dans le contexte du débit de base, les auteurs concluant que l'effet de l'infiltration sur le débit de base des cours d'eau était ambigu en raison des inconnues sur le mouvement des eaux de subsurface. Le mouvement potentiel des eaux souterraines à travers le karst urbain, décrit comme les canaux et les tranchées à haute perméabilité qui abritent les services publics souterrains, crée des difficultés pour relier l'infiltration des eaux pluviales à l'échelle du bassin versant au débit de base des cours d'eau (Bonneau et al., 2017). L'évapotranspiration associée à la végétation des infrastructures vertes est encore mal estimée (Thom et al., 2020).

Tableau 6.6 Études sur les infrastructures vertes à l'extérieur du bassin des Grands Lacs.

Eaux pluviales et infrastructures « vertes »	Lieu de l'étude	Référence
Performance hydrologique des pavés perméables	Montréal, Canada	(Vaillancourt et al., 2019)
Examen de 100 études de gestion des eaux pluviales	Divers, international	(Jefferson et al., 2017)
Examen de l'infiltration des eaux pluviales dans l'environnement urbain	Divers, international	(Bonneau et al., 2017)
Voie d'écoulement pour l'infiltration des eaux pluviales	Melbourne, Australie	(Bonneau, Fletcher, et al., 2018)
Développement à faible impact et débit de base	Clarksburg, Maryland, États-Unis	(Bhaskar, Hogan, et al., 2016)

Eaux pluviales et infrastructures « vertes »	Lieu de l'étude	Référence
Examen des outils de modélisation du développement à faible impact	Modèles, pas de lieu spécifique	(Kaykhosravi et al., 2018)
Transpiration des arbres et mesures de contrôle des eaux pluviales	Melbourne, Australie	(Thom et al., 2020)
Risque de contamination des eaux souterraines urbaines par un système d'infiltration des eaux de pluie	Minnesota, États-Unis	(de Lambert et al., 2021)
Comparaison de l'infiltration des eaux pluviales à partir de puits secs et de bassins d'infiltration	Modèles, pas de lieu spécifique	Sasidharan et al., 2021)

Dans leur étude, Bonneau et al. (2017) ont signalé un manque de connaissances lié aux effets de l'infiltration des eaux pluviales sur la recharge des eaux souterraines et le débit de base dans les cours d'eau urbains. Bhaskar, Hogan et al. (2016) ont constaté que les nouveaux développements urbains dans un bassin versant du Maryland, aux États-Unis, qui comprenaient des systèmes d'infiltration des eaux pluviales (« développement à faible impact ») avaient augmenté le débit total du cours d'eau et le débit de base par rapport aux bassins versants témoins (forêt et agriculture). Cela était probablement le résultat d'une réduction de l'évapotranspiration et d'une augmentation des sources ponctuelles de recharge; un changement du bilan hydrique qui était une « conséquence involontaire » du « développement à faible impact » (Bhaskar, Hogan, et al., 2016). Dans une étude de suivi, Bhaskar et al. (2018) ont examiné les fluctuations de la nappe phréatique dans le même bassin versant urbanisé, notant une certaine augmentation des niveaux de la nappe phréatique en aval des emplacements d'infiltration des eaux pluviales. Cependant, ils ont conclu qu'il n'est pas simple de relier la gestion des eaux pluviales par infiltration et la recharge des eaux souterraines (Bhaskar et al., 2018). Une étude holistique de la subsurface des eaux pluviales infiltrées a illustré les complexités et le défi de faire des prédictions sur les effets du débit de base (Bonneau, Fletcher, et al., 2018). En revanche, une étude menée à Clarksburg, dans le Maryland, a documenté l'influence des pratiques de développement à faible impact (IVGEP) sur le débit de base (Bhaskar, Hogan, et al., 2016). Un examen de 11 outils de modélisation du développement à faible impact a illustré les lacunes des outils disponibles, notant que tous les modèles examinés nécessitent une amélioration des calculs du bilan hydrique, notamment dans la comptabilisation de l'évapotranspiration et de l'infiltration (Kaykhosravi et al., 2018). Dans une étude menée en Australie, Locatelli et al. (2017) ont constaté que le développement urbain avec infiltration des eaux pluviales entraînait une augmentation de la recharge des eaux souterraines, une diminution de l'évapotranspiration, une élévation de la nappe phréatique et un risque accru d'infiltration des eaux souterraines « au-dessus du terrain ».

de Lambert et al. (2021) ont étudié le risque de contamination des eaux souterraines urbaines par un système d'infiltration des eaux pluviales. Ils ont constaté que le nombre et les concentrations de contaminants (virus, autres agents pathogènes, produits pharmaceutiques, produits de soins personnels, etc.) dans les eaux souterraines étaient considérablement réduits par rapport aux échantillons d'eaux pluviales et d'eaux vadoses prélevés sous la galerie d'infiltration. Une étude réalisée en France (Lebon et al., 2021) a révélé des différences significatives dans le carbone organique dissous, les concentrations d'éléments nutritifs, la biomasse du biofilm et les structures des communautés bactériennes dans les eaux souterraines échantillonnées en aval des systèmes d'infiltration des eaux pluviales; par rapport aux eaux souterraines échantillonnées en amont de ces systèmes. Une augmentation des activités microbiennes, de la richesse bactérienne et de la diversité des biofilms des eaux souterraines a été observée en aval pendant une période pluvieuse, mais pas pendant une période sèche.

D'autres études récentes ont examiné indirectement les liens entre les eaux pluviales et les eaux souterraines. Par exemple, Masoner et al. (2019) ont recueilli des échantillons d'eaux pluviales urbaines sur 21 sites à travers les États-Unis, y compris dans la région des Grands Lacs. Ils ont constaté que les eaux pluviales transportent des quantités substantielles de mélanges de contaminants organiques, notamment des hydrocarbures aromatiques polycycliques, des pesticides, des produits pharmaceutiques et d'autres produits chimiques, qui ont potentiellement une répercussion sur les eaux souterraines et les eaux de surface. De même, Spahr et al. (2020) ont fourni un examen de l'occurrence des traces de contaminants organiques hydrophiles (p. ex. pesticides, plastifiants, ignifugeants) dans les eaux pluviales urbaines. Masoner et al. (2019) ont déclaré que leur étude soulignait le besoin continu d'études sur le devenir, le transport et la persistance des contaminants des eaux pluviales infiltrés dans les eaux souterraines. Pinasseau et al. (2020) ont trouvé des concentrations plus élevées de certains produits chimiques organiques (p. ex. carbendazime, diuron) dans les eaux souterraines influencées par l'infiltration des eaux pluviales. En revanche, certains contaminants hérités (p. ex. les herbicides atrazine et simazine) dans les eaux souterraines ont été dilués par la même infiltration des eaux pluviales. Bork et al. (2021) ont signalé que les systèmes d'infiltration des eaux pluviales présentent un risque de pollution des eaux souterraines urbaines par les biocides couramment utilisés.

Répercussions connexes sur la qualité de l'eau et la santé

L'intérêt pour la mise en œuvre d'IVGEP a augmenté, mais certaines préoccupations relatives à la qualité de l'eau et aux inondations restent toujours présentes (Prudencio & Null, 2018). L'IVGEP permet l'infiltration des eaux pluviales au fil du temps, mais elle a le risque d'introduire des polluants dans les eaux souterraines (Jalali & Rabotyagov, 2020). Cette préoccupation est particulièrement importante pour les zones urbaines où les surfaces hydrostatiques sont peu profondes. Zhang & Chui (2018) ont fourni une distance recommandée à la nappe phréatique d'au moins 1,5 à 3 mètres sous le fond des cellules de biorétention pour réduire la hauteur des monticules d'eau souterraine formés. Pour comprendre les répercussions des IVGEP sur la dynamique des eaux souterraines, il est

recommandé d'utiliser des modèles multi-échelles (Zhang & Chui, 2018). Une installation appropriée de l'IVGEP permettra d'atténuer les inondations au sein des quartiers urbains. Steis Thorsby et al. (2020) ont constaté que l'installation d'IVGEP à l'extrémité amont du réseau d'égouts pluviaux génère la plus grande réduction des inondations dans les maisons. L'IVGEP est un outil important pour gérer les eaux pluviales, mais il est nécessaire de comprendre les compromis d'entreposage des eaux souterraines par rapport aux préoccupations de santé publique liées au risque d'inondation et aux problèmes de qualité des eaux souterraines

L'élaboration de politiques, de pratiques et de programmes pertinents par différents niveaux de gouvernement.

Les infrastructures vertes peuvent déplacer les eaux de ruissellement vers les eaux souterraines par une infiltration améliorée ou par d'autres méthodes. Une étude réalisée en 2018 a comparé les plans de contrôle à long terme utilisés par 25 villes américaines afin de quantifier les types d'infrastructures grises et vertes (IVGEP) utilisées par les collectivités pour résoudre divers problèmes liés aux eaux pluviales, notamment les débordements d'égouts unitaires. Les facteurs clés d'adoption d'une infrastructure verte comprennent des mesures liées à la gouvernance de la gestion des eaux pluviales. Cinq villes jouant un rôle prédominant en matière d'infrastructure verte (celles qui ont consacré plus de 20 % du budget du plan de contrôle à l'infrastructure verte) ont été identifiées, et trois de ces villes se trouvent dans le BGL; Milwaukee (WI), Syracuse (NY) et Buffalo (NY). L'étude a révélé que le facteur le plus important était la capacité à profiter d'une « fenêtre politique » pour intégrer l'infrastructure verte dans les plans de gestion des eaux pluviales. Sur de longues périodes, ces villes ont créé un élan en faveur de l'infrastructure verte par le biais d'une série de phases : l'expérimentation, la démonstration et enfin la transition complète vers des approches de gestion des débordements d'égouts unitaires. (Hopkins et al., 2018).

Une analyse des politiques et des données du comté d'Onondaga, dans l'État de New York (région de Syracuse), a illustré que la gouvernance participative, avec une forte influence et un engagement des citoyens, peut augmenter les infrastructures vertes. Les mesures incitatives, combinées à des politiques de sensibilisation, peuvent jouer un rôle important lorsque les instruments réglementaires sont absents (Lieberherr & Green, 2018). L'outil de planification de scénarios « Gray to Green » (G2G) fournit une structure pour faciliter les conversations et les actions visant à intégrer la planification des forêts urbaines et des infrastructures vertes dans la gestion des eaux pluviales. Deux études de cas (Milwaukee, Wisconsin, et Tampa, Floride) illustrent l'application de l'outil de planification de scénarios, qui a quantifié les avantages de différentes pratiques de gestion des eaux pluviales (Tsegaye et al., 2019).

Au Canada, le volet eau (partenariat de plusieurs offices de protection de la nature en Ontario) du « Sustainable Technologies Evaluation Program » (STEP - Programme d'évaluation des technologies durables - <https://sustainabletechnologies.ca>) a mené divers projets liés aux IVGEP. Il s'agit notamment de divers projets de recherche, d'évaluation des technologies et de surveillance, ainsi que la création de documents d'orientation, comme le « Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide » (Credit

Valley Conservation Authority, Office de protection de la nature de Toronto et de la région, 2011). D'après les informations affichées sur le site Web du STEP, aucun projet actuel ne se concentre spécifiquement sur la compréhension des liens entre les IVGEP et les eaux souterraines.

Bien qu'il y ait eu de nombreuses études récentes sur les eaux pluviales et l'infrastructure verte, l'accent a surtout été mis sur les changements dans les flux d'eau de surface et leurs paramètres, ainsi que sur la qualité des eaux de surface. Les études quantifiant spécifiquement les changements de qualité ou de quantité des eaux souterraines sont moins courantes. Le manque d'informations sur les eaux souterraines a des implications pour le bassin des Grands Lacs, par exemple : (1) la quantification du flux des eaux souterraines n'est pas un objectif de la recherche actuelle, donc ce besoin scientifique n'a pas été satisfait; et (2) une myriade d'études de projets d'infrastructure verte déduisent le rôle des eaux souterraines dans l'atténuation d'une série de problèmes liés aux eaux de surface. Cependant, peu d'études ont été menées sur l'effet d'une infiltration supplémentaire des eaux pluviales sur la qualité des eaux souterraines ou sur les effets à long terme sur la qualité des eaux de surface; étant donné que les eaux pluviales infiltrées se déplacent lentement dans la subsurface pour se déverser à certains endroits dans les affluents ou directement dans les Grands Lacs.

6.3 Besoins scientifiques prioritaires antérieurs

Cette section contient des mises à jour pour les besoins scientifiques prioritaires identifiés comme 6A à 6E (du tableau 6.1). Celles-ci sont présentées dans les sections 2.3.1 à 2.3.5; les mises à jour pour le besoin scientifique 6F sont entièrement couvertes dans les sections 2.1 et 2.2.

6.3.1 Collecte et analyse des données aux fins de gestion des ressources en eau souterraine urbaine (6A)

En ce qui concerne la planification et la gestion, un groupe de travail en Europe a décrit la subsurface comme étant « loin des yeux, loin du cœur », ce qui a entraîné une importante lacune dans les connaissances critiques (Mielby & Sandersen, 2017). Gogu et al. (2017) ont observé que les villes luttent en raison d'un manque de connaissances détaillées et précises sur l'environnement souterrain et l'interaction entre les infrastructures urbaines et les eaux souterraines urbaines. Barnes et al. (2018) ont souligné le manque actuel d'accès aux données sur les eaux souterraines urbaines, notant la nécessité d'une base de données nationale pour faciliter une recherche interprétative efficace et efficiente. Dochartaigh et al. (2019) ont noté que les eaux souterraines urbaines sont souvent mal comprises et donc négligées et gérées de manière inefficace, en particulier dans les villes où le pompage des eaux souterraines est limité, car il existe peu de données sur les eaux souterraines.

Des publications récentes documentent également une prise de conscience mondiale croissante d'un besoin de mieux comprendre les eaux souterraines urbaines (tableau 6.7). Les progrès sont particulièrement évidents en Europe, où « Sub-Urban », une action de coopération européenne en science et technologie a été lancée en 2013 pour améliorer la

compréhension et l'utilisation de l'environnement urbain souterrain (Campbell et al., 2017). Un des objectifs de Sub-Urban est de former des liens entre les experts en géosciences de subsurface en milieu urbain (p. ex. les agences géologiques nationales, les chercheurs universitaires et autres) et les décideurs urbains, les planificateurs, les praticiens (consultants et entrepreneurs privés), les développeurs qu'ils servent et la communauté de recherche au sens large. En 2017, Sub-Urban s'était étendue pour inclure un réseau de plus de 150 chercheurs et 23 villes participant activement (Campbell et al., 2017).

En réfléchissant de manière globale à l'environnement souterrain urbain, von der Tann et al. (2018), ont noté que l'environnement souterrain offre de nombreux services aux communautés urbaines (p. ex. la stabilité des bâtiments, la fourniture d'eau potable et de matériaux, le fait de servir de source de chaleur ou de bassin de rétention, l'accueil des infrastructures et du développement, etc.). Ils ont fait valoir que les décisions concernant l'attribution et la gestion du sous-sol urbain, y compris les eaux souterraines, doivent être prises d'une manière beaucoup plus complète et intégrée, par rapport à la pratique actuellement utilisée. À l'heure actuelle, dans le BGL, les décisions susceptibles de modifier et d'affecter de manière significative l'environnement souterrain sont généralement prises de manière ad hoc, au cas par cas, au fur et à mesure que les propositions de développement de changement d'utilisation des terres sont présentées pour approbation. En général, la planification de la subsurface est absente de la pensée et de la pratique actuelles au sein du BGL.

Ces exemples illustrent le fait que ces lacunes scientifiques sont toujours des problèmes nationaux et mondiaux, et ne se limitent pas au BGL (voir le tableau 6.7).

Tableau 6.7 Exemples de villes où les efforts de recherche pour comprendre les eaux souterraines urbaines se sont récemment développés.

Bassin des Grands Lacs	
Toronto et les zones urbaines environnantes, Canada	(Holysh & Gerber, 2014)
Ailleurs	
Glasgow, Royaume-Uni	(Dochartaigh et al., 2019)
Berlin, Allemagne	(Frick et al., 2019; Kuhlemann et al., 2020)
Bucarest, Roumanie	(Gogu et al., 2019)
Milan, Italie	(De Caro et al., 2020)
Barcelone, Espagne	(Tubau et al., 2017)
Odense, Danemark	(Mielby & Sandersen, 2017)

Comme l'indiquent Warner et al. (2016), la plupart des grandes zones urbaines du BGL ne dépendent pas des eaux souterraines comme source d'eau potable. Par conséquent, elles reçoivent peu d'attention dans les centres urbains des Grands Lacs, à moins que des problèmes ne surviennent. La gestion des eaux souterraines dans les zones urbaines du BGL est en grande partie réactive. Il y a très peu de « gestion » active. Par exemple, dans la région du Grand Toronto, les services de consultants sont retenus au besoin pour aider à

résoudre des problèmes spécifiques d'eaux souterraines urbaines (p. ex. l'assèchement pour de grands projets de construction ou des déversements/incidents de contamination). Cependant, en général, les données et les interprétations recueillies dans le cadre de ces études ne sont pas synthétisées pour éclairer les futures activités de gestion de l'eau. Les rapports sont plutôt des documents autonomes, et les données et connaissances qu'ils contiennent finissent par être perdues et oubliées. Ce manque de données de surveillance cohérentes liées aux eaux souterraines, associé à une gestion généralement médiocre des informations existantes, est un thème commun relevé dans de nombreux articles qui traitent de l'hydrogéologie urbaine (Dochartaigh et al., 2019 ; Tubau et al., 2017).

En raison de l'approche réactive de la gestion des eaux souterraines dans le BGL, le personnel technique chargé de la gestion des eaux souterraines, notamment celui des niveaux provincial, étatique et municipal, continue de lutter pour obtenir des données permettant de caractériser, de comprendre et de gérer de façon proactive les conditions des eaux souterraines dans les zones urbaines du BGL.

Compte tenu de la situation actuelle de manque de données, la modélisation numérique est susceptible de devenir un outil de plus en plus essentiel pour aider les gestionnaires à mieux explorer et comprendre les conditions des eaux souterraines dans les zones urbaines. Les modèles, et les connaissances qu'ils permettent d'acquérir, bénéficient toujours de données supplémentaires pour contraindre les entrées du modèle. Cependant, même dans les zones pauvres en données, avec une vérification, une validation et une calibration appropriées, les modèles numériques peuvent aider à améliorer la compréhension des systèmes d'eaux souterraines urbaines. Dans leur étude sur Baltimore, dans le Maryland, Barnes et al. (2018) ont combiné une base de données hydrogéologiques limitée avec des données topographiques à plus haute résolution (Lidar), des données sur l'utilisation des terres, la couverture végétale et les infrastructures pour explorer le rôle de l'imperméabilité dans six sous-bassins versants urbains différents. L'une de leurs conclusions a noté que la variabilité de l'entreposage de subsurface diminue à mesure que l'imperméabilité augmente dans un bassin versant. Cette constatation a été attribuée à une combinaison de diminution de l'infiltration et de l'évapotranspiration dans les bassins versants plus urbanisés. Bien que l'étude ait permis d'élucider de larges caractéristiques hydrogéologiques, l'incertitude de nombreux paramètres attribués empêche l'application du modèle de manière plus générale et limite l'exploration de conditions plus détaillées des eaux souterraines urbaines.

Une étude réalisée à Bâle, en Suisse, s'est également appuyée sur une modélisation complète dans un cadre urbain pour évaluer et atténuer les répercussions potentielles de la construction de tunnels routiers sur le régime d'écoulement des eaux souterraines (Epting et al., 2008). L'étude s'est penchée à la fois sur les pratiques à court terme (p. ex. l'assèchement de la construction) et sur les pratiques à plus long terme (p. ex. la mise en place d'installations de subsurface imperméables telles que des murs de séparation, des tunnels, etc., qui entraînent des déviations de l'écoulement des eaux souterraines à long terme). Les eaux souterraines étant utilisées par de nombreuses industries, les données

urbaines disponibles ont été complétées par des puits de surveillance liés à la construction et des tests de pompages pour paramétrer le modèle. L'étude a démontré l'utilisation réussie de la modélisation numérique dans un cadre urbain complexe, spatialement et temporellement variable, pour orienter les activités de construction dans des directions spécifiques afin de minimiser les répercussions négatives sur les ressources en eaux souterraines.

Côté canadien du BGL, de nombreux modèles numériques à l'échelle régionale ont été réalisés dans de vastes régions de l'Ontario et englobent de nombreux centres urbains (p. ex. Toronto, Waterloo, Guelph, Barrie, Newmarket, Brampton, Milton, etc.). Ces études exhaustives de modélisation numérique ont été entreprises entre 2007 et 2015 dans le cadre de l'initiative de protection des sources d'eau (PSE) de la province. Les études étaient une réponse à la tragédie de Walkerton en 2000, où la contamination bactérienne provenant d'une source de fumier dans l'un des puits d'approvisionnement en eau souterraine de la ville a entraîné une maladie grave chez quelque 2000 résidents et la mort de six personnes. Les modèles de PSE ont été principalement utilisés pour délimiter les zones de protection des têtes de puits d'approvisionnement des municipalités en fonction de la qualité et de la quantité. Souvent, les puits d'approvisionnement en eau potable des municipalités sont situés en dehors des zones urbaines, mais même lorsque les puits sont situés à l'intérieur d'une zone urbaine la zone de protection des têtes de puits délimitée s'étend généralement en dehors des centres urbains dans les zones rurales adjacentes.

Bien que les modèles ne soient paramétrés qu'avec des données limitées dans les zones urbaines, ils constituent néanmoins un assemblage complet des données existantes à l'échelle régionale. Les modèles constituent également une synthèse des données permettant de comprendre les conditions géologiques et hydrogéologiques de subsurface. Compte tenu de la synthèse de la géologie et de l'hydrogéologie régionales qui a été intégrée aux modèles, ces derniers représentent une occasion significative. Si les modèles sont maintenus en état de fonctionnement, tout en continuant à collecter de nouvelles données, les modèles peuvent être affinés et mis à jour pour faire la lumière sur une variété de questions hydrogéologiques (Marchildon et al., 2017). Parmi les questions qui pourraient être approfondies, citons l'étude de l'interaction entre les eaux souterraines et les infrastructures d'égouts ou les cours d'eau urbains, la qualité des eaux souterraines et la façon dont la connectivité des eaux souterraines et l'interaction avec les Grands Lacs peuvent évoluer dans le temps avec le changement climatique.

Les modèles numériques, et les connaissances actuelles qu'ils ont fournies, sont déjà utilisés à d'autres fins. Par exemple, la ville de Barrie se préoccupe de la façon dont les activités de construction en profondeur peuvent affecter la qualité des eaux souterraines dans les puits d'approvisionnement municipaux. En utilisant les connaissances existantes intégrées à son modèle de protection des sources d'eau (Bester, 2013), la ville a récemment élaboré un processus de gestion des risques pour évaluer les propositions de développement et leur répercussion potentielle sur les ressources en eau souterraine (Martin, 2019). De même, pour mieux comprendre et délimiter les zones nécessitant une

protection des écosystèmes aquatiques, l'Office de protection de la nature de la région de Toronto a utilisé son modèle de protection des sources d'eau pour délimiter les zones de recharge des eaux souterraines significatives sur le plan environnemental (Taylor et al., communication écrite, 2019).

Le Programme des eaux souterraines de la moraine d'Oak Ridges (ORMGP – « Oak Ridges Moraine Groundwater Program ») est un programme innovateur qui présente un modèle potentiel pour la gestion et l'accessibilité des données sur les eaux souterraines. Le Programme couvre une superficie de plus de 30 000 km² le long de la rive nord du lac Ontario, s'étendant vers le nord dans le bassin versant de la baie Georgienne et du lac Huron. L'ORMGP est une initiative conjointe de 15 agences gouvernementales locales (municipalités et autorités de bassin versant) et a assemblé un système numérique d'analyse des eaux souterraines de 80 gigaoctets de données relatives à l'eau et à la géologie. Les données, les interprétations et les connaissances contenues dans les fichiers du programme ont été estimées de manière prudente à une valeur de 800 millions de dollars (communications écrites, ORMGP, 2020). Bien qu'une grande partie des données du programme, ainsi que des graphiques interprétatifs et des outils de cartographie, soient disponibles via un site Web librement accessible, le programme fournit également une section alternative protégée par un mot de passe où les utilisateurs techniques peuvent télécharger directement les données, voir des outils graphiques interactifs et à jour (p. ex. explorer l'interaction entre les événements climatiques et la réponse des eaux souterraines), accéder à plus de 11 000 rapports de consultation historiques et accéder aux données, fichiers et idées de modélisation numérique des eaux souterraines (p. ex. analyses du bilan hydrique).

L'un des mandats centraux de l'ORMGP est de gérer efficacement une base de données sur l'eau, qui sous-tend toutes les connaissances, les idées et la compréhension des systèmes d'écoulement menant finalement à une prise de décision solide.

En ce qui concerne la prise de décision relative aux eaux souterraines urbaines, il est également important de noter que l'ORMGP ne se concentre pas seulement sur la gestion des données, mais surtout sur l'accessibilité et l'utilisation des données. C'est par l'utilisation des données (p.ex. en interpolant une surface de nappe régionale, en identifiant les zones potentielles de décharge des eaux souterraines ou en créant des hydrogrammes à long terme) que les erreurs dans la base de données peuvent être identifiées et corrigées. Des efforts considérables sont déployés pour aider les agences partenaires à accéder rapidement aux informations issues de l'interprétation des données afin de fournir des informations aux décideurs (c'est-à-dire répondre à des questions telles que « le garage du deuxième étage nécessitera-t-il un assèchement permanent? »).

Face à une situation similaire à la pratique actuelle au sein du BGL (c'est-à-dire lorsque les données relatives aux eaux souterraines ne sont pas gérées de manière intentionnelle ni efficace), la Californie et le Nouveau-Mexique ont récemment adopté de nouvelles lois pour améliorer la gestion de leurs données sur l'eau. En 2016, la Californie a adopté la loi sur

l'ouverture et la transparence des données sur l'eau (AB 1755, Dodd), qui exige que huit organismes d'État créent, exploitent et maintiennent une plateforme intégrée de données sur l'eau à l'échelle de l'État et élaborent des protocoles pour rendre les données disponibles afin de soutenir la prise de décision. Le Nouveau-Mexique a adopté sa loi sur les données sur l'eau (NMSA 1978, 72-4B) en 2019 dans le but d'identifier et d'intégrer les données clés sur l'eau, tant pour les eaux souterraines que pour les eaux de surface. Dans les deux États, il a été reconnu que le manque de données et d'informations limitait la capacité à comprendre et à gérer l'eau. La législation oblige à coordonner, gérer et rendre accessible des ensembles de données sur l'eau autrefois disparates, mal gérés et inaccessibles à l'échelle étatique. Si elle était adoptée dans le cadre du BGL, une législation similaire répondrait au besoin de données coordonnées et accessibles sur les eaux souterraines.

6.3.2 Renseignements quantitatifs sur les sources de contaminants (6B)

Ce besoin scientifique concerne la quantification des sources qui contaminent les eaux souterraines urbaines et qui, à leur tour, peuvent avoir une répercussion sur la qualité de l'eau des Grands Lacs. Certaines études récentes liées à ce besoin scientifique sont présentées ci-dessus dans les sections 2.1 et 2.2. Plus précisément, les quelques études récentes (après 2016) se sont concentrées sur la quantification de l'exfiltration (fuite) des égouts sanitaires urbains, comme indiqué à la section 2.1.

Un vaste éventail de sources de contaminants en milieu urbain comprend des sources ponctuelles (p. ex. décharges, sites industriels, friches industrielles, déversements) et des sources diffuses (p. ex. applications de sels de voierie, d'engrais, de pesticides) (Warner et coll., 2016 ; Burri et coll., 2019 ; Gesels et coll., 2021). Dans le BGL, les informations quantitatives sur ces sources se présentent généralement sous forme de résumés de données mises en tableaux qui ne quantifient pas spécifiquement les répercussions sur les eaux souterraines (voir la section suivante), et les informations plus détaillées ne sont souvent pas accessibles au public (p. ex. les rapports de consultants pour le secteur privé).

Les recherches sur la contamination des eaux souterraines par ces sources sont généralement spécifiques à un site, ou axées sur un seul panache, et ne sont donc pas intégrées aux évaluations des sources de contaminants à l'échelle de la ville ou du bassin versant. Le manque d'informations quantitatives sur les sources qui contaminent les eaux souterraines dans les zones urbaines reflète non seulement la complexité de ces environnements et l'assemblage important et déroutant de sources connues et potentielles (White et al., 2016 ; Burri et al., 2019 ; Gesels et al., 2021 ; McCance et al., 2021), mais aussi les difficultés (p. ex. les défis juridiques) liées aux formalités juridiques entourant l'accessibilité des données produites par ces études. Cette réalité se reflète dans une étude récente d'un aquifère situé sous une ville du Royaume-Uni, dans laquelle de nombreux produits chimiques organiques, dont l'atrazine, la simazine et le naphtalène, ainsi qu'un taux élevé de nitrates, ont été détectés (White et al., 2016). Les auteurs ont observé que de multiples traceurs sont souvent nécessaires pour comprendre les contributions des

sources et des voies de contamination dans les eaux souterraines urbaines, en raison des sources variées de contaminants urbains.

Certaines recherches récentes ont abordé la nécessité de distinguer les sources de contaminants dans les eaux souterraines urbaines. Par exemple, pour tenter de distinguer les influences des contaminants urbains et agricoles, Kiefer et al. (2021) ont utilisé une approche d'analyse de dépistage (c'est-à-dire sans intention de cibler des composés spécifiques) et des analyses ciblées de substances chimiques organiques à l'état de traces dans des échantillons d'eau souterraine urbaine. Leurs analyses non ciblées ont permis de détecter certains polluants chimiques qui n'avaient pas été signalés auparavant dans les eaux souterraines. De nombreux composés sont restés non identifiés. Gesels et al. (2021) ont introduit des indicateurs basés sur des analyses d'éléments traces inorganiques pour quantifier et distinguer les répercussions de la pollution diffuse dans les zones urbaines et industrielles à partir de l'influence de la lithologie (géologie). De même, sur la base d'analyses d'ions majeurs, d'isotopes stables du nitrate et d'autres paramètres, Li et al. (2021) ont appliqué l'analyse typologique et d'autres techniques pour distinguer les sources anthropiques de contamination des eaux souterraines des « niveaux de fond naturels ». Propp et al. (2021) ont constaté que les analyses des édulcorants artificiels et d'autres contaminants de préoccupation émergente peuvent être utiles pour retracer la contamination des eaux souterraines urbaines à partir des anciennes décharges. Khazaei et Milne-Home (2017) ont constaté que les analyses de traces d'édulcorants artificiels étaient également utiles pour discriminer les sources d'effluents septiques et de sel de voirie pour le chlorure dans les eaux souterraines urbaines peu profondes près de Toronto, en Ontario.

L'élaboration de politiques, de pratiques et de programmes pertinents par différents niveaux de gouvernement

Dans le cadre de cet examen, aucune information n'a été trouvée sur les développements récents (après 2016) de politiques, de pratiques ou de programmes du BGL par les différents niveaux de gouvernement (y compris les municipalités) qui étaient directement liés à la quantification des flux de contaminants de diverses sources vers les eaux souterraines urbaines. Actuellement, aucun programme n'est en place pour quantifier les fuites des égouts sanitaires municipaux, ou pour quantifier les flux de contaminants provenant de sources urbaines, comme les déversements, les eaux pluviales et les fuites d'égouts, vers les eaux souterraines. De même, il semble qu'il n'y ait pas de programmes gouvernementaux en place pour estimer les charges de contaminants dans les eaux souterraines (et les risques associés) dans les zones urbaines à l'échelle de la ville ou du bassin versant, ou les changements dans ces charges en réponse à des sites spécifiques ou à des efforts d'assainissement à plus grande échelle. En outre, les évaluations des BGL font défaut en ce qui concerne les flux de contaminants des eaux souterraines urbaines vers les cours d'eau, les milieux humides et autres plans d'eau urbains. Ces commentaires

s'appliquent à la fois en général et spécifiquement aux secteurs préoccupants (SP) qui ont été identifiés dans le BGL, ce qui laisse des questions ouvertes sur le rôle des eaux souterraines dans les problèmes de qualité de l'eau des Grands Lacs.

Certains programmes gouvernementaux fournissent des informations générales sur les rejets de contaminants dans l'environnement du BGL. Par exemple, aux États-Unis, le programme fédéral « Toxics Release Inventory » (TRI) exige que les installations déclarent chaque année les quantités de produits chimiques toxiques rejetés dans l'environnement, y compris dans l'eau (plans d'eau de surface) et dans les terres (Agence des États-Unis de protection de l'environnement, 2019). Un grand nombre d'installations se trouvent dans des zones urbaines. La déclaration se fait par produit chimique (767 au total), y compris certaines substances perfluoroalkyliques et polyfluoroalkyliques (SPFA), qui ont été ajoutées en 2019. Les données relatives à la « mise en dépôt terrestre » comprennent les quantités éliminées par injection en profondeur du puits, mais ne fournissent aucune information sur les rejets dans les eaux souterraines urbaines peu profondes par des voies telles que l'infiltration des eaux pluviales et les fuites d'égouts.

Du côté canadien, Environnement et Changement climatique Canada fournit l'Inventaire national des rejets de polluants sous la forme d'une base de données en ligne (Environnement et Changement climatique Canada, 2021) contenant des informations générales sur les rejets (déversements, fuites, etc.) et les éliminations de plus de 320 polluants au Canada, y compris en Ontario, actuellement pour la période 1994-2019. Les données comprennent la quantité de chaque polluant rejeté, le site dans lequel le rejet ou l'élimination a eu lieu, et si c'était dans le sol, l'eau, l'air, ou une combinaison de ceux-ci. Il n'y a pas d'information spécifique sur les répercussions sur les eaux souterraines. De même, un certain nombre de bases de données historiques et plus récentes à l'échelle de l'Ontario fournissent une indication indirecte de la façon dont la qualité des eaux souterraines pourrait être affectée (p. ex. les rapports de conformité environnementale qui enregistrent les incidences des rejets de contaminants dans l'air, les égouts et l'eau) sont disponibles pour téléchargement via le catalogue de données ouvertes de la province (<https://data.ontario.ca/dataset/environmental-occurrences-and-spills>). Cependant, en résumé, aucune de ces sources n'est adéquate pour contribuer aux connaissances générales sur la qualité des eaux souterraines urbaines dans le BGL.

6.3.3 Surveillance de la qualité de l'eau souterraine et évaluation des risques potentiels pour la santé (6C)

De nombreux défis sont présents lorsque l'on tente de comprendre la qualité des eaux souterraines dans les zones urbaines, notamment la logistique pour accéder aux sites de surveillance et trouver des moyens efficaces pour informer les communautés de l'importance des eaux souterraines urbaines. Un nombre très limité de centres urbains dans le BGL utilise les eaux souterraines pour l'approvisionnement domestique. Par conséquent, il y a souvent une mentalité « loin des yeux, loin du cœur » en ce qui a trait aux eaux souterraines (Howard & Gerber, 2018). Cependant, la surveillance des eaux souterraines ne

tient pas compte des répercussions négatives des eaux souterraines contaminées dans les centres urbains sur les résidents par l'intrusion de vapeur, l'infiltration souterraine dans les maisons, l'interconnexion avec les canalisations d'égout/eau et la connexion avec les ressources en eau de surface. Pour mieux comprendre les risques pour la santé associés aux eaux souterraines urbaines, une surveillance et une gestion sont toutes deux essentielles. Une caractérisation claire de la qualité des eaux souterraines fournit à la fois une voie de remédiation et une base pour l'évaluation des risques sanitaires. Les principaux résultats liés à ce besoin scientifique ont été présentés dans les sections 2.1 et 2.2.

Deux études menées à Détroit (Carmichael et al., 2019; Sampson et al., 2019) ont examiné des méthodes qualitatives pour comprendre à la fois la santé environnementale et la santé physiologique des résidents en raison des inondations dues à l'infiltration des eaux souterraines (Carmichael et al., 2019; Sampson et al., 2019). L'étude de Sampson et al. (2019) a souligné l'importance de l'iniquité sociale dans la contribution aux expositions aux polluants des inondations intérieures à long terme et en cours. Ce type de recherche narrative fournit un exemple de la manière dont la communication et la collaboration entre les communautés et les municipalités peuvent conduire à des recommandations pratiques pour réduire le risque d'exposition.

L'élaboration de modèles de vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination, ou des répercussions sur la santé en raison des voies d'accès aux eaux souterraines, nécessite des approches solides à forte intensité de données, ce qui constitue un défi. Le modèle de vulnérabilité des eaux souterraines le plus couramment utilisé est DRASTIC (Aller et al., 1987). Dans un examen des modèles de type DRASTIC, trois approches ont été utilisées pour estimer la vulnérabilité des eaux souterraines. Celles-ci incluent des méthodes basées sur des indices, des approches statistiques, comme les modèles de régression, et l'utilisation de simulations pour prévoir le mouvement des contaminants des eaux souterraines (Barbulescu, 2020). Les modèles alternatifs au modèle DRASTIC et aux modèles de type DRASTIC sont présentés dans le tableau 6.8. Bien que ces modèles soient des outils utiles, ils sont souvent basés sur des données de terrain limitées; des informations qui peuvent s'avérer être essentielles pour comprendre les milieux urbains hétérogènes.

Tableau 6.8 Synthèse des articles sur la modélisation des risques et de la vulnérabilité des eaux souterraines urbaines.

Titre	Résumé	Citation
Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines : Méthodes DRASTIC et de type DRASTIC : Un examen	Examen des méthodes de type DRASTIC concernant la vulnérabilité des eaux souterraines.	Barbulescu, 2020

Titre	Résumé	Citation
Un examen critique de la modélisation intégrée des eaux urbaines, le drainage urbain et au-delà; Répercussion de l'approvisionnement en eau hybride sur le système d'eau centralisé.	Le modèle Urban-BEATS (Urban Biophysical Environments and Technologies Simulator) est un modèle multi-échelle permettant de modéliser le captage de l'eau à l'échelle d'une ville jusqu'aux lots individuels.	(Bach et al., 2014; Sitzenfri, 2017)
Analyse des risques possibles associés à la qualité des eaux pluviales urbaines pour la gestion de la recharge des aquifères.	« Managed aquifer recharge » (MAR – Gestion de la recharge des aquifère) est la recharge intentionnelle de l'eau dans les aquifères pour une récupération ultérieure ou un bénéfice environnemental.	Song et al. (2019)
Élaboration d'un système de modélisation multi-échelle pour évaluer la résilience des infrastructures de drainage vertes et grises sous l'effet du changement climatique et l'élévation du niveau de la mer.	« Interconnected Channel and Pond Routing Model » - Intégration de l'infrastructure verte et des égouts pluviaux dans le cadre d'une stratégie de résilience pour l'infrastructure de drainage urbain.	(Joyce et al., 2017)
Quantification de l'efficacité cumulative des infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales pour l'amélioration de la qualité de l'eau.	Classification de la vulnérabilité des aquifères à l'aide de l'analyse typologique « K-means ».	Jalali & Rabotyagov, 2020

6.3.4 Base data acquisition and monitoring of urban water balances (6D)

Ce besoin scientifique aborde la manière de quantifier comment les zones urbaines changent le bilan hydrologique et introduisent de nouvelles composantes. Le bilan hydrologique des zones urbaines peut changer de façon substantielle en raison de l'augmentation de l'imperméabilité, des zones artificielles de recharge concentrée, de l'irrigation et d'autres modifications anthropiques du sol et de la subsurface (Figures 6.1 et 6.2). Les principales conclusions relatives à ce besoin scientifique ont été présentées dans les sections 2.1 et 2.2.

Peu d'études ont été faites en rapport au besoin scientifique prioritaire d'acquisition de données de base et de surveillance des bilans hydrologiques urbains à différentes échelles

spatiales. Les études publiées au sein du BGL font particulièrement défaut. Toutefois, des recherches actives financées par l'EPA sont en cours aux États-Unis dans le cadre de l'Initiative de restauration des Grands Lacs (IRGL). Les sites de recherche actifs de l'IRGL sont situés à Fond du Lac (WI), Buffalo (NY) Detroit (MI), Gary (IN) (Service géologique des États-Unis, 2017) et des publications sont en préparation (W. Selbig, communication personnelle, 1/19/2021).

Il devient essentiel de comprendre la position de l'infrastructure d'égouts par rapport à la surface hydrostatique saturée pour découvrir quelles parties du réseau d'égouts pourraient perdre de l'eau vers le système d'eaux souterraines (c'est-à-dire les parties situées au-dessus de la nappe phréatique). Les égouts situés sous la nappe phréatique peuvent gagner en volume grâce à l'infiltration des eaux souterraines dans le système, modifiant considérablement le bilan hydrologique en altérant les voies d'écoulement naturelles des eaux souterraines. Cela entraîne également une augmentation des volumes et des coûts de traitement des eaux usées (la municipalité régionale de York, 2020). Des résultats d'une étude menée à Buffalo, dans l'État de New York, indiquent que les terrains vacants de la ville peuvent, de manière cumulative, infiltrer 51 à 54 % de volume de pluie annuel supplémentaire par rapport à l'état antérieur à la démolition. Ces résultats montrent que les terrains vacants, en tant qu'éléments paysagers, peuvent réduire les flux d'eau dans les infrastructures d'eaux usées vieillissantes en augmentant la recharge des eaux souterraines (Kelleher et al., 2020).

6.3.5 Recherches sur le déplacement des eaux souterraines urbaines et le devenir des contaminants (6E)

Recherches sur le déplacement des eaux souterraines urbaines

Le manque actuel de données est à l'origine d'une faible compréhension générale du déplacement des eaux souterraines dans les zones urbaines du BGL (voir 2.3.1). Comme nous l'avons expliqué à la section 2.1, cette situation est aggravée par les façons complexes dont l'infrastructure urbaine affecte le cycle hydrologique en milieu urbain, notamment en créant des karsts urbains pouvant servir de voies d'écoulement des eaux souterraines.

Au-delà des enquêtes à l'échelle locale (installation unique, site), les études récentes publiées sur le déplacement des eaux souterraines urbaines (p. ex. les systèmes d'écoulement) sont rares. Quelques études récentes ont examiné les systèmes d'écoulement des eaux souterraines urbaines à l'échelle du quartier ou de la région (Moeck et al., 2021; Newman et al., 2021; Teimoori et al., 2021). Par exemple, à Détroit, dans le Michigan, l'écoulement des eaux souterraines urbaines peu profondes a été évalué à une échelle régionale englobant quatre bassins versants majeurs et à une échelle locale contenant plusieurs pâtés de maisons (Teimoori et al., 2021). Un bilan hydrologique urbain local a été élaboré avec une simulation ultérieure des eaux souterraines pour évaluer l'effet des paramètres urbains sur l'écoulement des eaux souterraines. A Bâle, en Suisse, un système d'écoulement des eaux souterraines a été étudié en utilisant les âges apparents

des eaux souterraines basés sur des analyses d'hélium, ainsi que des données hydrochimiques, des isotopes de l'eau et des concentrations de perchloroéthylène (Moeck et al. (2021)). Cette étude a trouvé des preuves de mélange inter-aquifère et de voies d'écoulement préférentielles. En utilisant des techniques similaires, Newman et al. (2021) ont étudié les temps de séjour et les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans un aquifère urbain du Colorado (États-Unis). Ils ont également trouvé des preuves de mélange, notamment des eaux souterraines « jeunes » et « anciennes ». Les analyses et les techniques utilisées dans ces études peuvent être largement applicables aux études des eaux souterraines dans d'autres zones urbaines.

Recherches sur le devenir des contaminants dans les eaux souterraines urbaines : sel de déglçage

Warner et al. (2016) ont noté que l'utilisation du chlorure de sodium comme sel de déglçage (de voirie) est un problème sérieux et croissant de contaminants dans la plupart des zones urbaines du BGL. Depuis 2016, de nombreuses études sur la qualité des eaux souterraines urbaines dans le BGL et la région environnante ont porté sur le chlorure à la fois comme polluant et comme traceur (tableau 6.9). Certaines études ont sondé le sel de déglçage par rapport à d'autres sources de chlorure (Khazaei et Milne-Home, 2017; Oberhelman et Peterson, 2020). D'autres études ont examiné les concentrations de chlorure et les tendances connexes dans les cours d'eau urbains (Gutchess et al., 2018; Oberhelman et Peterson, 2020). En termes d'avancées scientifiques significatives, certaines études récentes ont commencé à examiner les répercussions plus larges du transport des sels de déglçage par les eaux souterraines et les eaux pluviales vers d'autres eaux urbaines, notamment les lacs, les cours d'eau et les milieux humides (Helmüller et al., 2020; Kelly et al., 2019; Minnesota Ground Water Association, 2020; Roy, 2019; Wyman & Koretsky, 2018).

Dans une étude récente menée dans le Maryland, Snodgrass et al. (2017) ont examiné comment les pratiques modernes de gestion des eaux pluviales affectent le déplacement du sel de voirie dans les bassins versants urbains. Ils ont observé que des panaches de chlorure et de sodium provenant du sel de voirie dans les eaux souterraines urbaines se déversaient dans les cours d'eau tout au long de l'année; ce qui indique un entreposage de ces ions dans les eaux souterraines. Ils en ont conclu que les pratiques modernes de gestion des eaux pluviales ne protègent pas les masses d'eau de surface de la contamination du sel de voirie.

Tableau 6.9 Études menées dans le BGL et dans la région environnante portant sur les chlorures en tant que polluant ou traceur.

Objet de l'étude	Lieu	Référence
Concentrations et tendances des chlorures dans les cours d'eau urbains	Centre de New York	Gutchess et al., 2018
Répercussions du transport de sel de déglacage sur un milieu humide urbain	Madison, Wisconsin	Helmuller et al., 2020
Répercussions du sel de déglacage sur les bassins versants urbains, notamment les étangs et les milieux humides.	Minnesota	Herb et al., 2017
Distinguer le sel de déglacage, les sources septiques et agricoles de chlorure.	Près de Toronto, Ontario	Khazaei & Milne-Home, 2017
Lien entre le taux d'application du sel de déglacage et le temps de séjour du chlorure dans les aquifères peu profonds.	Illinois	Ludwikowski & Peterson, 2018
Mobilisation du radium et du radon par le sel de déglacage dans les eaux souterraines urbaines.	Connecticut	McNaboe et al., 2017
Répercussions du sel de déglacage sur un lac urbain	Kalamazoo, Michigan	Wyman & Koretsky, 2018
Sel de déglacage et sources agricoles de chlorure; concentrations de chlorure et tendances dans les cours d'eau urbains.	Illinois	Oberhelman & Peterson, 2020;
Répercussions de la présence de chlorure dans les eaux souterraines sur les organismes endobenthiques des cours d'eau urbains.	Différents sites au Canada, notamment en Ontario	Roy, 2019;
Répercussions de l'infiltration des eaux pluviales sur le chlorure dans les eaux souterraines.	Minnesota	Minnesota Ground Water Association, 2020

Certains chercheurs ont conclu que l'entreposage historique des sels de déglacage dans la subsurface, notamment dans les eaux souterraines, constitue désormais un grave problème que nous avons hérité (Kelly et al., 2019; Warner et al., 2016). Les réductions de l'utilisation des sels de déglacage pourraient ne pas se traduire par une amélioration de la qualité de l'eau des cours d'eau avant des décennies (Kelly et al., 2019). En revanche, Ledford et al. (2016) ont déduit des temps de séjour beaucoup plus courts pour l'entreposage du sel de voirie dans un aquifère superficiel dans la zone riveraine d'un cours

d'eau urbain à Syracuse, dans l'État de New York (dans le BGL). Ils en ont conclu que cet entreposage temporaire dans les eaux souterraines tamponnait les concentrations dans les eaux de surface après les périodes de salage des routes.

Une conséquence fondamentale des études sur le sel de voirie démontre qu'il est nécessaire d'examiner les façons de repenser et de réduire l'utilisation du sel de déglacage dans les zones urbaines (Kelly et al., 2019; Ludwikowski & Peterson, 2018; Snodgrass et al., 2017). Cependant, il existe très peu d'article récents de revues scientifiques documentant des recherches à l'appui de telles initiatives (p. ex. Haake & Knouft, 2019; Kelly et al., 2019; Lembcke et al., 2017).

Développements récents de politiques/programmes pertinents dans le BGL concernant la contamination des eaux souterraines par les sels de déglacage

Un groupe de travail comprenant Conservation Ontario, la province de l'Ontario et le gouvernement du Canada a récemment publié un document d'orientation destiné à servir de ressource sur les pratiques exemplaires en matière de gestion environnementale pour l'utilisation de sels de voirie en hiver à des fins d'entretien (Ontario Good Roads Association, Conservation Ontario, 2018). En Ontario, le volet eau du « Sustainable Technologies Evaluation Program » (STEP - Programme d'évaluation des technologies durables) a inclus divers projets portant sur la gestion et l'utilisation des sels de déglacage. Par exemple, l'Office de protection de la nature de Toronto et de la région (2019) a récemment publié un document d'orientation sur l'approvisionnement pour la gestion de la neige et de la glace dans les parcs de stationnement. Ce document, élaboré à des fins éducatives, fournit des conseils sur des sujets tels que la livraison précise de sel, les alternatives à faible teneur en chlorure et la réduction des taux d'application de sel.

Aux États-Unis, la Minnesota Pollution Control Agency a récemment (2015) publié une version révisée du « Winter Parking Lot and Sidewalk Maintenance Manual ». Ce document fournit des directives sur des sujets tels que l'entreposage du sel et les taux d'application. Il comprend également des cas documentés de réduction de l'utilisation du sel, basés sur des entretiens avec des personnes ayant reçu une formation sur ces directives.

Recherches sur le devenir des contaminants dans les eaux souterraines urbaines: autres contaminants

D'autres études récentes qui ont examiné divers autres contaminants dans les eaux souterraines urbaines sont énumérées au tableau 6.10. La plupart ont porté sur les composés organiques à l'état de traces, notamment ceux qui suscitent de nouvelles préoccupations quant à leurs effets potentiels sur la santé humaine et les écosystèmes aquatiques. Certaines se sont penchées sur les flux observés ou potentiels de ces contaminants, de l'eau souterraine qui émerge vers les cours d'eau urbains (p. ex. Parajulee et al., 2017; Lemaire et al., 2020; Balbarini et al., 2020).

Les composés organiques volatils (COV) sont des contaminants courants des eaux souterraines urbaines qui présentent des risques d'intrusion de vapeur. L'intrusion de vapeur est considérée comme la voie ayant le plus grand potentiel d'exposition humaine sur les sites touchés par les COV dans les eaux souterraines (Ma et al., 2020). Les eaux souterraines contaminées offrent une possibilité d'intrusion souterraine de composés dangereux dans les bâtiments commerciaux et résidentiels (C. J. Miller et al., 2020). L'intrusion souterraine est désormais prise en compte dans le système de classement des dangers des États-Unis pour les désignations « Superfund » (Agence des États-Unis de protection de l'environnement (USEPA), 2017). Les modifications de la zone superficielle modifient les voies d'exposition aux contaminants en raccourcissant potentiellement les distances de déplacement et les temps de rétention hydraulique dans les eaux souterraines peu profondes (Voisin et al., 2018 ; Zhang & Chui, 2019).

Tableau 6.10 Exemples d'études récentes sur les contaminants dans les eaux souterraines urbaines.

Objet de l'étude	Lieu	Référence
Éventail de contaminants organiques dans les eaux souterraines urbaines	Royaume-Uni	(White et al., 2016)
Transport des eaux souterraines mentionné comme voie possible pour les benzotriazoles dans les cours d'eau urbains.	Toronto, ON	(Parajulee et al., 2017)
Les PFA dans les eaux souterraines comme traceurs de décharges	Australie	(Hepburn, Madden, et al., 2019; Hepburn, Northway, et al., 2019)
Sources de métaux lourds dans les eaux souterraines urbaines	Australie	(Hepburn et al., 2018)
Micropolluants anthropiques comme traceurs dans les eaux souterraines	Mondial (examen)	(W. Warner et al., 2019)
Sulfonamides et métabolites dans les eaux souterraines urbaines	Espagne	(Jurado et al., 2020)
Anti-inflammatoires non stéroïdiens et leurs métabolites dans un aquifère urbain	Espagne	(Jurado et al., 2021)

Objet de l'étude	Lieu	Référence
Insecticides néonicotinoïdes dans les eaux de surface, les eaux souterraines et les eaux usées	Minnesota	(Berens et al., 2021)
Éthènes chlorés dans les eaux souterraines urbaines	Italie Danemark Suisse	(Pollicino et al., 2019) (Lemaire et al., 2020) (Moeck et al., 2021)
Produits pharmaceutiques dans les eaux souterraines émergeant dans un cours d'eau	Danemark	(Balbarini et al., 2020)
Modèle conceptuel pour l'intrusion de vapeur à partir des eaux souterraines à travers les canalisations d'égouts	États-Unis	(Beckley & McHugh, 2020)

6.4 Besoins et possibilités scientifiques critiques/émergents

D'après cet examen, on est de plus en plus conscient de plusieurs besoins scientifiques qui nécessiteront une attention ciblée et accrue dans un avenir immédiat. Comme il est décrit ci-dessous, il existe des possibilités nouvelles et croissantes de combler certaines de ces lacunes scientifiques prioritaires émergentes.

6.4.1 Besoin de collecte, de transmission, de stockage et de visualisation des données

Gestion des données

Dans nos environnements urbains, il existe un besoin important et continu d'améliorer la gestion des données et l'accès aux données concernant les ressources en eau, notamment les eaux souterraines. Ce besoin ne cessera de croître à mesure que davantage de données seront collectées en temps réel grâce à l'arrivée rapide de technologies plus intelligentes. Les nouvelles méthodes et technologies émergentes (p. ex. l'analyse des données massives, l'Internet des objets, l'informatique périphérique et l'apprentissage automatique) ont le pouvoir de changer rapidement la façon dont les données sur l'eau sont traitées, transformées et analysées. Cependant, elles nécessitent d'abord une infrastructure de gestion des données robuste avant que leur puissance puisse être exploitée pour la prise de décision.

Traitement des données

La gestion des données n'est qu'une première étape dans la transition vers une meilleure prise de décision en matière de gestion des eaux urbaines. Les techniques de traitement

des données et les outils de visualisation, permettant de dégager des informations à partir de grands ensembles de données afin d'évaluer rapidement les tendances temporelles, spatiales et liées à la profondeur, constituent une suite nécessaire à la gestion des données. L'internet des objets (IdO) facilite la connexion des objets physiques sur le terrain à des capteurs, des logiciels et d'autres technologies via l'internet. Les nouveaux dispositifs de surveillance de l'eau utilisent souvent la technologie de l'IdO pour surveiller les réseaux d'égouts (Salam, 2020a, 2020b), les débordements d'égouts unitaires (Zhang et Chui, 2018) et les eaux de surface (Shafi et al., 2018). La croissance récente de l'utilisation de l'IdO a suscité des besoins supplémentaires en matière de traitement. Le calcul en périphérie de réseau est un paradigme informatique relativement nouveau qui permet aux capteurs de communiquer avec un système informatique distribué (Erol-Kantarci & Sukhmani, 2018; Satyanarayanan, 2017; Shi et al., 2016; Shi & Dustdar, 2016). Le calcul en périphérie de réseau permet le traitement des données en temps réel sur des serveurs de périphérie situés plus près des appareils mobiles, des capteurs ou des utilisateurs finaux, ce qui réduit la dépendance à l'égard de l'informatique en nuage. Si ces technologies offrent des possibilités pour les solutions d'eau intelligente, il est important de prendre conscience de leurs limites et d'évaluer les risques de mauvaise gestion des données (Moy de Vitry et al., 2019).

Parmi les exemples réussis, on peut citer l'approche analytique des données massives pour la gestion des eaux souterraines dans la région de la Communauté de développement de l'Afrique australe en Afrique (Gaffoor et al., 2020) et pour les grands programmes régionaux d'échantillonnage des eaux souterraines (Kang et al., 2020 ; Latchmore et al., 2020). La combinaison des données en temps réel sur les eaux souterraines avec d'autres données pertinentes peut soutenir la prise de décision pour une gestion durable des eaux souterraines. Les exemples incluent des systèmes d'aide à la décision comme AquaVar DDS en France (Ma 2020) et la plateforme proposée Water4Cities (Rizou 2018). En outre, les outils informatiques qui peuvent évaluer la qualité des eaux souterraines et les voies d'exposition sont essentiels pour établir des environnements urbains sains. Avec les nouvelles contraintes de style de vie en réponse à la COVID-19, l'intrusion souterraine dans les ménages à partir des eaux souterraines par inondation ou intrusion de vapeur devient de plus en plus préoccupante (Miller et al., 2020). En outre, l'utilisation de la technologie d'IdO pour surveiller la présence de virus dans les eaux souterraines est un autre domaine qui suscite un intérêt accru (par exemple Salem et al., 2021).

Utilisation de capteurs

Les progrès récents en matière de disponibilité et d'accessibilité des capteurs permettront de les utiliser davantage pour la surveillance des eaux souterraines. La combinaison des technologies de l'information et des communications (TIC) avec la technologie des capteurs peut améliorer la gestion efficace des données de terrain, facilitant ainsi une prise de décision plus rapide et améliorée (Park et al., 2020). Cette combinaison de TIC peut permettre une plus grande résolution spatiale et temporelle de la qualité de l'eau dans des endroits urbains difficiles à atteindre. En outre, les capteurs constituent un outil potentiel

d'économie en réduisant le temps de réponse et en minimisant l'impact lorsque des fuites ou des problèmes de qualité de l'eau se produisent. L'initiative « Water4Cities » proposée (Chen & Han, 2018; Rizou et al., 2018) est un exemple de cette approche. Il s'agit d'une plateforme de TIC qui aborde la disponibilité, la quantification et la qualité de l'eau urbaine à l'échelle de la ville en utilisant une infrastructure de surveillance par capteurs et des outils robustes de visualisation des données..

Ressources de données ouvertes

Les ressources de données ouvertes permettent d'évaluer plus facilement les besoins hydrologiques concurrents et interdépendants des villes urbaines. En plus de l'accès aux données, la mise à disposition d'outils et d'une visualisation facile à utiliser est un moyen essentiel d'améliorer les ressources de données ouvertes équitables.

Récemment, le Michigan Department of Environment, Great Lakes, and Energy (EGLE) a publié son nouveau portail Web de cartes et de données contenant toutes les cartes et données publiques de l'EGLE, du département des transports et du département des ressources naturelles du Michigan (Michigan Department of Environment Great Lakes and Energy, 2021). La plateforme universelle est un site de données ouvert qui ne nécessite pas de programme informatique spécial ni de formation officielle en système d'information géographique (SIG) pour accéder aux fichiers ou aux outils. Depuis des décennies, Le National Water Information System (NWIS) du Service géologique des États-Unis fournit un accès en ligne à leurs données sur les eaux de surface, les eaux souterraines et la qualité de l'eau. Un effort pluriannuel de plusieurs millions de dollars est en cours pour mettre à jour et améliorer l'infrastructure et l'interface du NWIS. Sa modernisation comprendra l'amélioration de l'accès et du soutien aux utilisateurs, la normalisation des formats de données et l'amélioration des liens entre les séries chronologiques et les données discrètes pour les ensembles de données sur les eaux de surface, les eaux souterraines, ainsi que la qualité et l'utilisation de l'eau (<https://help.waterdata.usgs.gov/news/Feb-12-2019>).

Pour un aperçu des bases de données nationales et internationales, le Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science (CUAHSI) héberge une liste de ports de données ouverts élaborée par le Global Water Information Interest Group de la Research Data Alliance.

Bien qu'il ne s'agisse pas d'une liste complète, les ressources du tableau 6.11 constituent un point de départ pour évaluer les sources de données ouvertes locales du BGL et internationales. Elles offrent également des exemples aux entités qui envisagent de créer ou d'améliorer la disponibilité des ressources de données.

Tableau 6.11 Exemples de sources de données ouvertes.

Groupe	Nom	Lieu	Propriétaire
CUAHSI	Open Water Data Initiative (OWDI)	https://www.cuahsi.org/data-models/portals	Federal Geographic Data Committee
CUAHSI	Data portals list	https://www.cuahsi.org/data-models/portals	Global Water Information Interest Group
Internet of Water	IoW Water Data Hubs	https://internetofwater.org/resources/hubs/	User defined.
Great Lakes Observing System	Data portals list	https://www.glos.us/	Integrated Ocean Observing System
Oak Ridges Water	Programme des eaux souterraines de la moraine d'Oak Ridges	Oakridgeswater.ca	Programme des eaux souterraines de la moraine d'Oak Ridges

6.4.2 Besoin d'une science multidisciplinaire à l'appui d'une gestion holistique de la subsurface urbaine

Dans un souci d'optimisme, la gestion future des villes des Grands Lacs et de leurs environnements urbains s'orientera vers des approches plus holistiques incluant la gestion du sous-sol. Il s'agirait notamment d'une gestion globale des eaux urbaines, notamment de l'eau souterraine.

Bien que de telles approches aient fait défaut, il existe des développements récents prometteurs. Par exemple, comme déjà mentionné ci-dessus, « Sub-Urban » est une initiative récente visant à améliorer la compréhension et l'utilisation de la subsurface urbaine et à promouvoir la coopération entre les experts et les chercheurs du sous-sol urbain, les décideurs urbains, les planificateurs, les praticiens et les développeurs (Campbell et al., 2017). Certaines indications suggèrent l'émergence d'approches plus holistiques pour gérer les eaux urbaines dans le BGL. Par exemple, Tovilla et Webb (2017) ont trouvé des preuves d'un transfert lent mais régulier des connaissances par les

municipalités de l'Ontario; de leur utilisation des normes du système de gestion pour la protection de l'eau potable municipale (comme l'exige la province) à leurs secteurs des eaux usées et des eaux pluviales. Douze services publics municipaux de l'Ontario ont soit récemment adopté des systèmes de gestion environnementale pour leurs systèmes d'eaux usées et d'eaux pluviales ou sont en train d'adopter de tels systèmes. La plupart de ces municipalités se trouvent dans le BGL (Tovilla, 2020).

L'émergence d'approches holistiques pour gérer la subsurface urbaine nécessitera le soutien de programmes scientifiques plus complets et multidisciplinaires. Ces programmes devraient inclure des efforts de coopération entre des experts en géosciences, en hydrologie, en hydrogéologie, en génie civil/géotechnique, en chimie, en microbiologie, en écologie et dans d'autres domaines pertinents.

6.4.3 Besoin de comprendre l'influence des infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales (IVGEP) sur les eaux souterraines

Des IVGEP correctement conçues et situées peuvent fournir des solutions durables en matière de gestion des eaux pluviales en favorisant l'infiltration. Cependant, les répercussions de l'ajout d'eau pluviale dans les eaux souterraines du voisinage ne sont généralement pas mesurées (Masoner et al, 2019; Selbig & Banerman, 2007; Burant et al, 2018; Spahr et al, 2020) (études affiliées à Selbig... [commentaire de Shuster]). Un manque de compréhension des répercussions de l'introduction d'eau supplémentaire, possiblement de mauvaise qualité, dans le système d'eau souterraine, par le biais d'installation d'IVGEP, entraîne des lacunes de connaissance dans les budgets hydrologiques urbains. En outre, il est nécessaire d'améliorer la compréhension de l'influence des eaux pluviales sur la qualité des eaux souterraines et de la façon dont elle pourrait être liée aux préoccupations de santé urbaine, d'autant plus que la plupart des épidémies de maladies d'origine hydrique aux États-Unis proviennent de l'exposition à des eaux souterraines non traitées avec les eaux de crue (Andrade et al., 2018; Ashbolt, 2019). Pour répondre aux incertitudes/défis relatifs à la quantité et à la qualité des eaux souterraines liés aux IVGEP, il est nécessaire de surveiller les eaux souterraines urbaines. Actuellement, des chercheurs évaluent l'impact des IVGEP sur les eaux souterraines à Détroit par le biais d'un programme financé par l'EPA aux États-Unis appelé « GSI-Informed Urban Groundwater Monitoring Networks » (C. Miller et al., 2021). Ce programme espère développer des solutions communautaires à faible coût pour évaluer l'impact des IVGEP sur l'écoulement et la qualité des eaux souterraines dans les quartiers urbains.

6.5 Mise à jour du tableau des besoins scientifiques prioritaires

Bien que des mesures progressives aient été prises pour mieux caractériser la qualité et l'écoulement des eaux souterraines dans les zones urbaines des bassins des Grands Lacs, les eaux souterraines continuent de rester « loin des yeux, loin du cœur » par rapport aux eaux de surface. Le manque de sensibilisation et de considération des eaux souterraines dans les études de planification et de recherche, ainsi que le manque de données et

d'accès aux données existantes, continuent d'entraver l'évaluation de la qualité des eaux souterraines urbaines et du cycle hydrologique en milieu urbain. Le tableau 6.12 reflète les besoins scientifiques actualisés spécifiques à une évaluation adéquate de la qualité des eaux souterraines urbaines et du cycle hydrologique urbain qui inclut les eaux souterraines.

Tableau 6.12 Mise à jour des besoins scientifiques prioritaires, en référence à la liste de 2016 (tableau 6.1 - le nouveau texte est indiqué en gras).

Mise à jour des besoins scientifiques prioritaires	Besoins connexes et lacunes en matière d'information
<p>6A. Collecte et analyse des données aux fins de gestion des ressources en eau souterraine urbaine.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Comptabilisation de l'utilisation de l'eau. - Utilisation accrue des outils de modélisation des eaux souterraines urbaines, appuyée par des données suffisantes pour permettre la vérification, la validation et l'étalonnage. - Entretien et mise à jour continus des modèles (« modèles vivants »). - création et alimentation de bases de données souterraines à long terme, couvrant l'ensemble d'une ville (p. ex. qualité de l'eau, extraction, niveaux d'eau, géologie, infrastructures) et intégrant des données spécifiques au projet. - accès accru aux données (de préférence en ligne). - cartographie des nappes phréatiques urbaines (y compris une variabilité saisonnière) pour mieux comprendre l'exfiltration des conduites d'eau/des égouts et l'infiltration dans les égouts. - cartographie de la profondeur des infrastructures des conduites d'eau et d'égouts. - Surveillance et quantification des bilans hydrologiques urbains. - Quantification des taux d'exfiltration et d'infiltration des conduites d'eau et d'égout, notamment les installations septiques. - Quantification des transferts vers le système d'eau souterraine à partir des SIG ou des installations d'eaux pluviales.

Mise à jour des besoins scientifiques prioritaires	Besoins connexes et lacunes en matière d'information
6B. Données quantitatives, informations et cartes en ligne sur la qualité de l'eau souterraine urbaine, notamment les sources, les transferts et le devenir des contaminants**.	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifications chimiques, acquisition de données de base et surveillance - Disponibilité accrue en ligne des données de surveillance des sources ponctuelles et des sites; - Surveillance de fond des eaux souterraines urbaines afin d'établir des niveaux et une variabilité des sources diffuses (p. ex, le sel de voirie, les engrais pour pelouses, etc.)
6C. Évaluation des risques potentiels pour la santé liés à la dégradation de la qualité de l'eau souterraine urbaine.	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleure compréhension de l'exposition humaine à l'eau souterraine urbaine dégradée et des risques potentiels pour la santé (maladies); - Meilleure compréhension des voies d'exposition par intrusion des eaux souterraines peu profondes.
6D. Surveillance et recherche holistiques sur l'écoulement de l'eau souterraine urbaine à des échelles multiples qui saisissent l'interaction avec l'infrastructure urbaine, notamment les eaux pluviales, les eaux usées, l'infrastructure verte, les systèmes d'eau municipaux, les bâtiments, les tunnels, les cours d'eau, les lacs et les milieux humides.	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleure compréhension du rôle cumulatif des infrastructures urbaines sur l'écoulement de l'eau souterraine. - Surveillance et gestion de l'assèchement. - Meilleure compréhension des mécanismes de migration de l'eau souterraine à travers les corridors d'infrastructure « karst urbain ». - Connaissance et surveillance liées aux rejets d'eaux pluviales/SIG (quantité et qualité) dans les systèmes d'eaux souterraines. - Quantification de l'influence de l'urbanisation sur le bilan hydrologique.

* Le texte ajouté ici intègre l'ancien besoin prioritaire 6D (tableau 6.1) : « Acquisition de données de base et une surveillance des bilans hydrologiques urbains ».

** Le texte ajouté ici intègre l'ancien besoin prioritaire 6E (tableau 6.1) : « Recherches sur le déplacement des eaux souterraines urbaines et le devenir des contaminants ».

Références:

Ali, H., & Choi, J. H. (2019). A review of underground pipeline leakage and sinkhole monitoring methods based on wireless sensor networking. *Sustainability (Switzerland)*,

11(15). <https://doi.org/10.3390/su11154007>

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency. *Washington, DC*, 455.
- American Society of Civil Engineers. (2017). 2017 Wastewater Grade. Retrieved from <https://www.infrastructurereportcard.org/americas-grades/>
- Andrade, L., O'Dwyer, J., O'Neill, E., & Hynds, P. (2018). Surface water flooding, groundwater contamination, and enteric disease in developed countries: A scoping review of connections and consequences. *Environmental Pollution*, 236, 540–549. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.104>
- Ashbolt, N. J. (2019). Flood and Infectious Disease Risk Assessment. In *Health in Ecological Perspectives in the Anthropocene* (pp. 145–159). Springer - Singapore.
- Attard, G., Rossier, Y., Winiarski, T., Cuvillier, L., & Eisenlohr, L. (2016). Deterministic modelling of the cumulative impacts of underground structures on urban groundwater flow and the definition of a potential state of urban groundwater flow: example of Lyon, France. *Hydrogeology Journal*, 24(5), 1213–1229. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1385-z>
- Attard, G., Rossier, Y., & Eisenlohr, L. (2016). Urban groundwater age modeling under unconfined condition - Impact of underground structures on groundwater age: Evidence of a piston effect. *Journal of Hydrology*, 535, 652–661. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.034>
- Avellaneda, P. M., & Jefferson, A. J. (2020). Sensitivity of Streamflow Metrics to Infiltration-Based Stormwater Management Networks. *Water Resources Research*, 56(7), e2019WR026555. <https://doi.org/10.1029/2019WR026555>
- Avellaneda, P. M., Jefferson, A. J., Grieser, J. M., & Bush, S. A. (2017). Simulation of the cumulative hydrological response to green infrastructure. *Water Resources Research*, 53, 3087–3101. Retrieved from doi:10.1002/%0A2016WR019836
- Baker, N.T., Sullivan, D.J., Selbig, W.R., Haefner, R.J., Lampe, D.C., Bayless, R., and McHale, M.R., 2022, Green infrastructure in the Great Lakes—Assessment of performance, barriers, and unintended consequences: U.S. Geological Survey Circular 1496, 70 p., <https://doi.org/10.3133/cir1496>.
- Balbarini, N., Frederiksen, M., Rønde, V., Moller, I., Sonne, A.T., McKnight, U.S., Pedersen, J.K., Binning, P.J., Bjerg, P.L. 2020. Assessing the transport of pharmaceutical compounds in a layered aquifer discharging to a stream. *Groundwater* 58(2), 208-223.
- Barbulescu, A. (2020). Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-like methods: A review. *Water (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/W12051356>
- Barnes, M. L., Welty, C., & Miller, A. J. (2018). Impacts of Development Pattern on Urban

- Groundwater Flow Regime. *Water Resources Research*, 54, 5198–5212. <https://doi.org/10.1029/2017WR022146>
- Berens, M.J., Capel, P.D., Arnold, W.A. 2021. Neonicotinoid Insecticides in Surface Water, Groundwater, and Wastewater Across Land-Use Gradients and Potential Effects. *Environmental Toxicology and Chemistry* 40(4), pp. 1017-1033.
- Berghuijs, W. R., & Kirchner, J. W. (2017). The relationship between contrasting ages of groundwater and streamflow. *Geophysical Research Letters*, 44(17), 8925–8935. <https://doi.org/10.1002/2017GL074962>
- Bester, M. (2013). *City of Barrie Tier 3 Water Budget and Local Area Risk Assessment. Consulting report prepared by AquaResource Inc. in partnership with International Water Consultants and Golder Associates for Lake Simcoe Conservation Authority.* Retrieved from https://maps.cloca.com/Html5Viewer/Index.html?configBase=https://maps.cloca.com/Geocortex/Essentials/REST/sites/CAMC_Public_Map/viewers/Boreholes/virtualdirectory/Resources/Config/Default&run=WebHyperlink_NumericalModels
- Bhaskar, A. S., Hogan, D. M., & Archfield, S. A. (2016). Urban base flow with low impact development. *Hydrological Processes*, 30, 3156–3171. <https://doi.org/10.1002/hyp.10808>
- Bhaskar, A. S., Beesley, L., Burns, M. J., Fletcher, T. D., Hamel, P., Oldham, C. E., & Roy, A. H. (2016). Will it rise or will it fall? Managing the complex effects of urbanization on base flow. *Freshwater Science*, 35(1), 293–310. <https://doi.org/10.1086/685084>
- Bhaskar, A. S., Hogan, D. M., Nimmo, J. R., & Perkins, K. S. (2018). Groundwater recharge amidst focused stormwater infiltration. *Hydrological Processes*, 32, 2058–2068. <https://doi.org/10.1002/hyp.13137>
- Bonneau, J., Fletcher, T. D., Costelloe, J. F., & Burns, M. J. (2017). Stormwater infiltration and the ‘urban karst’ – A review. *Journal of Hydrology*, 552, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.043>
- Bonneau, J., Burns, M. J., Fletcher, T. D., Witt, R., Drysdale, R. N., & Costelloe, J. F. (2018). The impact of urbanization on subsurface flow paths – A paired-catchment isotopic study. *Journal of Hydrology*, 561(April), 413–426. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.022>
- Bonneau, J., Fletcher, T. D., Costelloe, J. F., Poelsma, P. J., James, R. B., & Burns, M. J. (2018). Where does infiltrated stormwater go? Interactions with vegetation and subsurface anthropogenic features. *Journal of Hydrology*, 567, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.006>
- Bork, M., Lange, J., Graf-Rosenfellner, M., Hensen B., Olsson O., Hartung T., Fernández-Pascual, E., Lang, F. 2021. Urban storm water infiltration systems are not reliable sinks for biocides: evidence from column experiments. *Scientific Reports* 11(1), 7242

- Burant, A., Selbig, W., Furlong, E. T., & Higgins, C. P. (2018). Trace organic contaminants in urban runoff: Associations with urban land-use. *Environmental pollution*, 242, 2068-2077.
- Burri, N.M., Weatherl, R., Moeck, C., Schirmer, M. 2019. A review of threats to groundwater quality in the Anthropocene. *Science of the Total Environment* 684, 136-154.
- Campbell, D., De Beer, J., Mielby, S., Van Campenhout, I., Van Der Meulen, M., Eriksson, I., et al. (2017). Transforming the Relationships between Geoscientists and Urban Decision-Makers: European Cost Sub-Urban Action (TU1206). *Procedia Engineering*, 209, 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.124>
- Carmichael, C., Danks, C., & Vatovec, C. (2019). Green Infrastructure Solutions to Health Impacts of Climate Change: Perspectives of Affected Residents in Detroit, Michigan, USA. *Sustainability*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/su11205688>
- Chen, Y., & Han, D. (2018). Water quality monitoring in smart city: A pilot project. *Automation in Construction*, 89, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.008>
- Clarke, B. G., Magee, D., Dimitrova, V., Cohn, A. G., Du, H., Mahesar, Q., et al. (2017). A decision support system to proactively manage subsurface utilities. In *International Symposium for Next Generation Infrastructure 2017 Conference Proceedings* (pp. 99–108). ISNGI.
- Council of Canadian Academies. (2009). *The Sustainable Management of Groundwater in Canada/Expert Panel on Groundwater*. <https://cca-reports.ca/reports/the-sustainable-management-of-groundwater-in-canada/>
- Credit Valley Conservation Authority, Toronto and Region Conservation Authority, 2011. Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide. Version 1.0. <https://cvc.ca/wp-content/uploads/2012/02/lid-swm-guide-intro.pdf>
- de Lambert, J.R., Walsh, J.F., Scher, D.P., Firnstahl, A.D., Borchardt, M.A. 2021. Microbial pathogens and contaminants of emerging concern in groundwater at an urban subsurface stormwater infiltration site. *Science of the Total Environment* 775,145738
- Dochartaigh, B. O., Bonsor, H., & Bricker, S. (2019). Improving understanding of shallow urban groundwater: The Quaternary groundwater system in Glasgow, UK. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 108(2–3), 155–172. <https://doi.org/10.1017/S1755691018000385>
- Eklund, B., Beckley, L., Yates, V., & McHugh, T. E. (2012). Overview of state approaches to vapor intrusion. *Remediation Journal*, 22(4), 7–20. <https://doi.org/10.1002/rem.21327>
- Environment and Climate Change Canada. (2021). National Pollutant Release Inventory. Retrieved from <https://www.canada.ca/en/services/environment/pollution-waste-management/national-pollutant-release-inventory.html>
- Epting, J., Huggenberger, P., & Rauber, M. (2008). Integrated methods and scenario

- development for urban groundwater management and protection during tunnel road construction: A case study of urban hydrogeology in the city of Basel, Switzerland. *Hydrogeology Journal*, 16(3), 575–591. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0242-5>
- Erol-Kantarci, M., & Sukhmani, S. (2018). Caching and Computing at the Edge for Mobile Augmented Reality and Virtual Reality (AR/VR) in 5G. In *Ad Hoc Networks* (pp. 169–177). Springer.
- Fanelli, R., Prestegard, K., & Palmer, M. (2017). Evaluation of infiltration-based stormwater management to restore hydrological processes in urban headwater streams. *Hydrological Processes*, 31(19), 3306–3319. <https://doi.org/10.1002/hyp.11266>
- Forand Steven, P., Lewis-Michl Elizabeth, L., & Gomez Marta, I. (2012). Adverse Birth Outcomes and Maternal Exposure to Trichloroethylene and Tetrachloroethylene through Soil Vapor Intrusion in New York State. *Environmental Health Perspectives*, 120(4), 616–621. <https://doi.org/10.1289/ehp.1103884>
- Foster, S. (2020). Global policy overview of groundwater in Urban development-A tale of 10 cities! *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020456>
- Gaffoor, Z., Pietersen, K., Jovanovic, N., Bagula, A., & Kanyerere, T. (2020). Big Data Analytics and Its Role to Support Groundwater Management in the Southern African Development Community. *Water*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/w12102796>
- Gesels, J., Dollé, F., Leclercq, J., Jurado, A., Brouyère, S. Groundwater quality changes in peri-urban areas of the Walloon region of Belgium. *Journal of Contaminant Hydrology* 240, 103780.
- Gogu, C. R., Campbell, D., & De Beer, J. (2017). Preface: The Urban Subsurface - from Geoscience and Engineering to Spatial Planning and Management. *Procedia Engineering*, 209, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.123>
- Grande, E., Visser, A., & Moran, J. E. (2020). Catchment storage and residence time in a periodically irrigated watershed. *Hydrological Processes*, 34(14), 3028–3044. <https://doi.org/10.1002/hyp.13798>
- Gutchess, K., Jin, L., Ledesma, J. L. J., Crossman, J., Kelleher, C., Lautz, L., & Lu, Z. (2018). Long-Term Climatic and Anthropogenic Impacts on Streamwater Salinity in New York State: INCA Simulations Offer Cautious Optimism. *Environmental Science and Technology*, 52(3), 1339–1347. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04385>
- Haake, D. M., & Knouft, J. H. (2019). Comparison of Contributions to Chloride in Urban Stormwater from Winter Brine and Rock Salt Application. *Environmental Science and Technology*, 53(20), 11888–11895. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02864>
- Helmüller, G., Magnuson, J. J., & Dugan, H. A. (2020). Spatial and Temporal Patterns of Chloride Contamination in a Shallow, Urban Marsh. *Wetlands*, 40(3), 479–490. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01199-y>

- Hepburn, E., Northway, A., Bekele, D., Liu, G. J., & Currell, M. (2018). A method for separation of heavy metal sources in urban groundwater using multiple lines of evidence. *Environmental Pollution*, 241, 787–799. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.004>
- Hepburn, E., Madden, C., Szabo, D., Coggan, T. L., Clarke, B., & Currell, M. (2019). Contamination of groundwater with per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from legacy landfills in an urban re-development precinct. *Environmental Pollution*, 248, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.018>
- Hepburn, E., Northway, A., Bekele, D., & Currell, M. (2019). Incorporating perfluoroalkyl acids (PFAA) into a geochemical index for improved delineation of legacy landfill impacts on groundwater. *Science of the Total Environment*, 666, 1198–1208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.203>
- Herb, W., Janke, B., Stefan, H. 2017. Study of De-Icing Salt Accumulation and Transport Through a Watershed. Minnesota Department of Transportation, Local Road Research Board, St. Paul, MN. Research Project, Final Report 2017-50. <https://www.dot.state.mn.us/research/reports/2017/201750.pdf>
- Hoard, C. J., Haefner, R. J., Shuster, W. D., Pieschek, R. L., & Beeler, S. (2020). Full Water-Cycle Monitoring in an Urban Catchment Reveals Unexpected Water Transfers (Detroit MI, USA). *Journal of the American Water Resources Association*, 56(1), 82–99. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12814>
- Hopkins, K. G., Grimm, N. B., & York, A. M. (2018). Influence of governance structure on green stormwater infrastructure investment. *Environmental Science and Policy*, 84, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.03.008>
- Howard, K., & Gerber, R. (2018). Impacts of urban areas and urban growth on groundwater in the Great Lakes Basin of North America. *Journal of Great Lakes Research*, 44(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2017.11.012>
- Ishii, E., Watanabe, Y., Agusa, T., Hosono, T., & Nakata, H. (2021). Acesulfame as a suitable sewer tracer on groundwater pollution: A case study before and after the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquakes. *Science of the Total Environment*, 754, 142409. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142409>
- Jalali, P., & Rabotyagov, S. (2020). Quantifying cumulative effectiveness of green stormwater infrastructure in improving water quality. *Science of the Total Environment*, 731, 138953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138953>
- Jarden, K. M., Jefferson, A. J., & Grieser, J. M. (2016). Assessing the effects of catchment-scale urban green infrastructure retrofits on hydrograph characteristics. *Hydrological Processes*, 30(10), 1536–1550. <https://doi.org/10.1002/hyp.10736>
- Jasechko, S., Kirchner, J. W., Welker, J. M., & McDonnell, J. J. (2016). Substantial proportion of global streamflow less than three months old. *Nature Geoscience*, 9(2), 126–129. <https://doi.org/10.1038/ngeo2636>

- Jefferson, A. J., Bhaskar, A. S., Hopkins, K. G., Fanelli, R., Avellaneda, P. M., & McMillan, S. K. (2017). Stormwater management network effectiveness and implications for urban watershed function: A critical review. *Hydrological Processes*, *31*, 4056–4080. <https://doi.org/10.1002/hyp.11347>
- Jurado, A., Margareto, A., Pujades, E., Vázquez-Suñé, E., & Diaz-Cruz, M. S. (2020). Fate and risk assessment of sulfonamides and metabolites in urban groundwater. *Environmental Pollution*, *267*, 115480. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115480>
- Jurado, A., Vázquez-Suñé, E., Pujades, E. 2021. Urban groundwater contamination by non-steroidal anti-inflammatory drugs. *Water (Switzerland)* *13*(5),720
- Kaddouraa, K., & Zayed, T. (2018). An integrated assessment approach to prevent risk of sewer exfiltration. *Sustainable Cities and Society*, *41*, 576–586. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.032>
- Kang, M., Perrone, D., Wang, Z., Jasechko, S., & Rohde, M. M. (2020). Base of fresh water, groundwater salinity, and well distribution across California. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(51), 32302. <https://doi.org/10.1073/pnas.2015784117>
- Kaykhosravi, S., Khan, U. T., & Jadidi, A. (2018). A comprehensive review of low impact development models for research, conceptual, preliminary and detailed design applications. *Water*, *10*, 1541. <https://doi.org/10.3390/w10111541>
- Kelleher, C., Golden, H. E., Burkholder, S., & Shuster, W. (2020). Urban vacant lands impart hydrological benefits across city landscapes. *Nature Communications*, *11*, 1563. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15376-9>
- Kelly, V. R., Findlay, S. E., Hamilton, S. K., Lovett, G. M., & Weathers, K. C. (2019). Seasonal and Long-Term Dynamics in Stream Water Sodium Chloride Concentrations and the Effectiveness of Road Salt Best Management Practices. *Water, Air, and Soil Pollution*, *230*(1). <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4060-2>
- Kesik, T. 2015. Best practices guide: Management of inflow and infiltration in new urban developments. Institute for Catastrophic Loss Reduction, February 2015. ICLR research paper series – number 5. [Layout 1 \(iclr.org\)](https://www.iclr.org/research/papers/layout1)
- Khazaei, E., & Milne-Home, W. (2017). Applicability of geochemical techniques and artificial sweeteners in discriminating the anthropogenic sources of chloride in shallow groundwater north of Toronto, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*, *189*(5). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5927-1>
- Kiefer, K., Du, L., Singer, H., Hollender, J. 2021. Identification of LC-HRMS nontarget signals in groundwater after source related prioritization. *Water Research* *196*,116994
- Kleywegt, S., Raby, M., McGill, S., & Helm, P. (2020). The impact of risk management measures on the concentrations of per- and polyfluoroalkyl substances in source and treated drinking waters in Ontario, Canada. *Science of the Total Environment*, *748*,

141195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141195>

- Latchmore, T., Hynds, P., Brown, R. S., Schuster-Wallace, C., Dickson-Anderson, S., McDermott, K., & Majury, A. (2020). Analysis of a large spatiotemporal groundwater quality dataset, Ontario 2010–2017: Informing human health risk assessment and testing guidance for private drinking water wells. *Science of The Total Environment*, 738, 140382. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140382>
- Lauwo, S., Sharvelle, S., & Roesner, L. (2012). *A Review of Advanced Sewer System Designs and Technologies. Final report.* Retrieved from <https://www.waterrf.org/system/files/resource/2019-09/INFR4SG09d.pdf>
- Lebon, Y., Navel, S., Moro, M., Voisin, J., Cournoyer, B., François, C., Volatier, L., Mermillod-Blondin, F. 2021. Influence of stormwater infiltration systems on the structure and the activities of groundwater biofilms: Are the effects restricted to rainy periods? *Science of the Total Environment* 755,142451.
- Ledford, S. H., Lautz, L. K., & Stella, J. C. (2016). Hydrogeologic Processes Impacting Storage, Fate, and Transport of Chloride from Road Salt in Urban Riparian Aquifers. *Environmental Science and Technology*, 50(10), 4979–4988. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00402>
- Lee, D. G., Roehrdanz, P. R., Feraud, M., Ervin, J., Anumol, T., Jia, A., et al. (2015). Wastewater compounds in urban shallow groundwater wells correspond to exfiltration probabilities of nearby sewers. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.048>
- Lemaire, G.G., McKnight, U.S., Schulz, H., Roost, S., Bjerg, P.L. 2020. Evidence of spatio-temporal variations in contaminants discharging to a peri-urban stream. *Groundwater Monitoring and Remediation* 40(2), 40-51.
- Lembcke, D., Thompson, B., Read, K., Betts, A., & Singaraja, D. (2017). Reducing road salt application by considering winter maintenance needs in parking lot design. *Journal of Green Building*, 12(2), 1–12.
- Lieberherr, E., & Green, O. O. (2018). Green infrastructure through Citizen Stormwater Management: Policy instruments, participation and engagement. *Sustainability (Switzerland)*, 10, 2099. <https://doi.org/10.3390/su10062099>
- Lisenbee, W., Hathaway, J., Negm, L., Youssef, M., & Winston, R. (2020). Enhanced bioretention cell modeling with DRAINMOD-Urban: Moving from water balances to hydrograph production. *Journal of Hydrology*, 582, 124491. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124491>
- Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnbjerg-Nielsen, K., Deletic, A., Roldin, M., & Binning, P. J. (2017). Hydrologic impact of urbanization with extensive stormwater infiltration. *Journal of Hydrology*, 544, 524–537. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.030>

- Ludwikowski, J. J., & Peterson, E. W. (2018). Transport and fate of chloride from road salt within a mixed urban and agricultural watershed in Illinois (USA): assessing the influence of chloride application rates. *Hydrogeology Journal*, 26(4), 1123–1135. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1732-3>
- Ma Q., Gourbesville P., Gaetano M. (2020) Aquavar: Decision Support System for Surface and Groundwater Management at the Catchment Scale. In: Gourbesville P., Caignaert G. (eds) *Advances in Hydroinformatics*. Springer Water. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5436-0_2
- Ma, J., McHugh, T., Beckley, L., Lahvis, M., DeVaul, G., & Jiang, L. (2020). Vapor Intrusion Investigations and Decision-Making: A Critical Review. *Environmental Science & Technology*, 54(12), 7050–7069. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00225>
- Maguire, T. J., & Fulweiler, R. W. (2016). Urban Dissolved Silica: Quantifying the Role of Groundwater and Runoff in Wastewater Influent. *Environmental Science and Technology*, 50(1), 54–61. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03516>
- Marchildon, M., Arnold, T., Holysh, S., & Gerber, R. (2017). *A Guide for Actively Managing Watershed-Scale Numerical Models in Ontario*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/319392650>
- Martin, P. (2019). *Groundwater management strategy for future development. Consulting report prepared by Aqua Insight Inc. for the City of Barrie*.
- Masoner, J. R., Kolpin, D. W., Cozzarelli, I. M., Barber, L. B., Burden, D. S., Foreman, W. T., et al. (2019). Urban Stormwater: An Overlooked Pathway of Extensive Mixed Contaminants to Surface and Groundwaters in the United States. *Environmental Science and Technology*, 53, 10070–10081. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02867>
- McCance, W., Jones, O.A.H., Cendón, D.I., Edwards M., Surapaneni A., Chadalavada, S., Currell, M. 2021. Decoupling wastewater impacts from hydrogeochemical trends in impacted groundwater resources. *Science of the Total Environment* 774,145781
- McGrane, S. J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 61(13), 2295–2311. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1128084>
- McHugh, T., Beckley, L., Sullivan, T., Lutes, C., Truesdale, R., Uppencamp, R., et al. (2017). Evidence of a sewer vapor transport pathway at the USEPA vapor intrusion research duplex. *Science of The Total Environment*, 598, 772–779. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.135>
- McNaboe, L. A., Robbins, G. A., & Dietz, M. E. (2017). Mobilization of Radium and Radon by Deicing Salt Contamination of Groundwater. *Water, Air, and Soil Pollution*, 228(3). <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3227-y>
- Michigan Department of Environment Great Lakes and Energy. (2021). EGLE Maps & Data Webpage. Retrieved from

<https://storymaps.arcgis.com/stories/5d741818f2fb4152a0abe795e7a98017>

Michigan Department of Transportation. (2020). *Standard Specifications for Construction, 2020.t*. Retrieved from <https://www.michigan.gov/mdot/-/media/Project/Websites/MDOT/Business/Construction/Standard-Specifications-Construction/2020-Standard-Specifications-Construction.pdf?rev=b944f71da7fb4f9c879f74659f64795b&hash=572ED32A1FC18C8D164C30D646450900>

Mielby, S., & Sandersen, P. B. E. (2017). Development of a 3D geological/hydrogeological model targeted at sustainable management of the urban water cycle in Odense City, Denmark. *Procedia Engineering*, 209, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.132>

Miller, C., Mitra, R., Dabney, B., Ekhaton, K., Hunt, D., Linn, C., et al. (2021). GSI-Informed Urban Groundwater Monitoring Networks. Retrieved from <https://cfpub.epa.gov/ncer/abstracts/index.cfm/fuseaction/display.abstractDetail/abstract/11118>

Miller, C. J., Runge-Morris, M., Cassidy-Bushrow, A. E., Straughen, J. K., Dittrich, T. M., Baker, T. R., et al. (2020). A review of volatile organic compound contamination in post-industrial urban centers: Reproductive health implications using a detroit lens. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8755), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238755>

Minnesota Ground Water Association. (2020). *Impacts of Stormwater Infiltration on Chloride in Minnesota Groundwater*. St. Paul, Minnesota. Retrieved from https://www.mgwa.org/documents/whitepapers/impacts_of_%0Astormwater_infiltration_on_chloride_in_minnesota_groundwater.pdf

Minnesota Pollution Control Agency, 2015. Winter Parking Lot and Sidewalk Maintenance Manual. Third Revision, June 2015. www.pca.state.mn.us/programs/roadsalt.htm

Moeck, C., Popp, A.L., Brennwald, M.S., Kipfer, R., Schirmer, M. 2021. Combined method of $3\text{H}/3\text{He}$ apparent age and on-site helium analysis to identify groundwater flow processes and transport of perchloroethylene (PCE) in an urban area. *Journal of Contaminant Hydrology* 238,103773

Mohammadi, M.M., Najafi, M., Kaushal, V., Serajiantehrani, R., Salehabadi, N., Ashoori, T. 2019. Sewer pipes condition prediction models: a State-of-the-Art review. *Infrastructures* 4(4):64.

Moy de Vitry, M., Schneider, M. Y., Wani, O. F., Manny, L., Leitão, J. P., & Eggimann, S. (2019). Smart urban water systems: what could possibly go wrong? *Environmental Research Letters*, 14(8), 81001.

Newman, C.P., Paschke, S.S., Keith, G. 2021. Natural and anthropogenic geochemical tracers to investigate residence times and groundwater–surface-water interactions in

an urban alluvial aquifer. *Water (Switzerland)* 13(6),871

Nguyen, H.H., Peche, A., Venohr, M. 2021. Modelling of sewer exfiltration to groundwater in urban wastewater systems: A critical review. *Journal of Hydrology* 596 (2021) 126130.

Nguyen, H.H., Venohr, M. 2021. Harmonized assessment of nutrient pollution from urban systems including losses from sewer exfiltration: a case study in Germany. *Environmental Science and Pollution Research*: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12440-9>

Oak Ridges Moraine Groundwater Program, 2020. Groundwater infrastructure - Ushering in the big data era on the ORM. Presentation to the Canadian National Chapter of the International Association of Hydrogeologists, December 20, 2020.

Oberhelman, A., & Peterson, E. W. (2020). Chloride source delineation in an urban-agricultural watershed: Deicing agents versus agricultural contributions. *Hydrological Processes*, 34(20), 4017–4029. <https://doi.org/10.1002/hyp.13861>

Ontario Good Roads Association, Conservation Ontario, 2018. Good Practices for Winter Maintenance in Salt Vulnerable Areas. June 2018. [SWP_Combined_SVA_Document.pdf \(conservationontario.ca\)](#)

Ontario Ministry of the Environment. (2008). *MOE Design Guidelines for Sewage Works 2008*. Publication No. PIBS 6879. <https://www.publications.gov.on.ca/design-guidelines-for-sewage-works-2008>

Parajulee, A., Lei, Y. D., De Silva, A. O., Cao, X., Mitchell, C. P. J., & Wania, F. (2017). Assessing the Source-to-Stream Transport of Benzotriazoles during Rainfall and Snowmelt in Urban and Agricultural Watersheds. *Environmental Science and Technology*, 51(8), 4191–4198. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05638>

Park, J., Kim, K. T., & Lee, W. H. (2020). Recent Advances in Information and Communications Technology (ICT) and Sensor Technology for Monitoring Water Quality. *Water*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020510>

Peche, A., Graf, T., Fuchs, L., & Neuweiler, I. (2017). A coupled approach for the three-dimensional simulation of pipe leakage in variably saturated soil. *Journal of Hydrology*, 555, 569–585. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.050>

Peche, A., Graf, T., Fuchs, L., & Neuweiler, I. (2019). Physically based modeling of stormwater pipe leakage in an urban catchment. *Journal of Hydrology*, 573(April), 778–793. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.016>

Penckwitt, J., van Geldern, R., Hagspiel, B., Packebusch, B., Mahr, A., Burkhardt, K., & Barth, J. A. C. (2016). Quantification of groundwater infiltration into urban sewer systems using stable isotopes. *Grundwasser*, 21(3), 217–225. <https://doi.org/10.1007/s00767-015-0310-z>

Pennsylvania Department of Environmental Protection. (2017). *Domestic Wastewater*

Facilities Manual. Pre-draft. Document No. 385-2188-004.
[https://files.dep.state.pa.us/publicparticipation/Advisory%20Committees/AdvCommPortalFiles/WRAC/2017/102517/Domestic%20Wastewater%20Facilities%20Manual%20\(PRE-DRAFT%202017-09-21%20clean\).pdf](https://files.dep.state.pa.us/publicparticipation/Advisory%20Committees/AdvCommPortalFiles/WRAC/2017/102517/Domestic%20Wastewater%20Facilities%20Manual%20(PRE-DRAFT%202017-09-21%20clean).pdf)

- Pinasseau, L., Wiest, L., Volatier, L., Mermillod-Blondin, F., & Vulliet, E. (2020). Emerging polar pollutants in groundwater: Potential impact of urban stormwater infiltration practices. *Environmental Pollution*, 266, 115387. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115387>
- Pollicino, L. C., Masetti, M., Stevenazzi, S., Colombo, L., & Alberti, L. (2019). Spatial statistical assessment of groundwater PCE (tetrachloroethylene) diffuse contamination in urban areas. *Water (Switzerland)*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/w11061211>
- Propp, V.R., De Silva, A.O., Spencer, C., Brown, S.J., Catingan, S.D., Smith, J.E., Roy, J.W. 2021. Organic contaminants of emerging concern in leachate of historic municipal landfills. *Environmental Pollution* 276, 116474
- Prudencio, L., & Null, S. E. (2018). Stormwater management and ecosystem services: A review. *Environmental Research Letters*, 13(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa81a>
- Raney, J. (2020). An overview of the pipe assessment arsenal. *Municipal Sewer & Water*, (February 20 Issue). https://www.mswmag.com/online_exclusives/2020/02/an-overview-of-the-pipe-assessment-arsenal
- Reynolds, J. H., & Barrett, M. H. (2003). A review of the effects of sewer leakage on groundwater quality. *Water and Environment Journal*, 17(1), 34–39. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2003.tb00428.x>
- Rizou, S., Kenda, K., Kofinas, D., Mellios, N., Pergar, P., Ritsos, P. D., et al. (2018). Water4Cities: an ICT platform enabling holistic surface water and groundwater management for sustainable cities. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 2, p. 695).
- Roehrdanz, P. R., Feraud, M., Lee, D. G., Means, J. C., Snyder, S. A., & Holden, P. A. (2017). Spatial Models of Sewer Pipe Leakage Predict the Occurrence of Wastewater Indicators in Shallow Urban Groundwater. *Environmental Science and Technology*, 51(3), 1213–1223. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05015>
- Roy, J. W. (2019). Endobenthic Organisms Exposed to Chronically High Chloride from Groundwater Discharging along Freshwater Urban Streams and Lakeshores. *Environmental Science and Technology*, 53(16), 9389–9397. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02288>
- Rutsch, M., Rieckermann, J., Cullmann, J., Ellis, J. B., Vollertsen, J., & Krebs, P. (2008). Towards a better understanding of sewer exfiltration. *Water Research*, 42(10–11),

2385–2394. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.01.019>

- Rutsch, Mandy, Rieckermann, J., & Krebs, P. (2006). Quantification of sewer leakage: A review. *Water Science and Technology*, 54(6–7), 135–144. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.616>
- Salam, A. (2020a). Internet of things for water sustainability. In *Internet of Things for sustainable community development* (pp. 113–145). Springer.
- Salam, A. (2020b). Internet of things in water management and treatment. In *Internet of Things for Sustainable Community Development* (pp. 273–298). Springer.
- Salem, H. S. A., Shams, M. Y., Hassanien, A. E., & Nosair, A. M. (2021). COVID-19 and Water Resources Nexus: Potential Routes for Virus Spread and Management Using Artificial Intelligence Techniques. In *The Global Environmental Effects During and Beyond COVID-19* (pp. 19-39). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72933-2_2
- Sampson, N. R., Price, C. E., Kassem, J., Doan, J., & Hussein, J. (2019). “We’re Just Sitting Ducks”: Recurrent Household Flooding as An Underreported Environmental Health Threat in Detroit’s Changing Climate. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph16010006>
- Sasidharan, S., Bradford, S.A., Šimůnek, J., Kraemer, S.R. 2021. Comparison of recharge from drywells and infiltration basins: A modeling study. *Journal of Hydrology*, v. 594, 125720, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125720>
- Satyanarayanan, M. (2017). The emergence of edge computing. *Computer*, 50(1), 30–39.
- Saville, A., & Adams, A. (2019). Balancing Environmental Remediation, Environmental Justice, and Health Disparities: the Case of Lake Apopka, Florida. *Case Studies in the Environment*, 3(1), 1–7. <https://doi.org/10.1525/cse.2018.001610>
- Selbig, W. R., & Bannerman, R. T. (2007). Evaluation of street sweeping as a stormwater-quality-management tool in three residential basins in Madison, Wisconsin. US Geological Survey, Scientific Investigations Report 2007-5156, <https://doi.org/10.3133/sir20075156>
- Shafi, U., Mumtaz, R., Anwar, H., Qamar, A. M., & Khurshid, H. (2018). Surface Water Pollution Detection using Internet of Things. In *2018 15th International Conference on Smart Cities: Improving Quality of Life Using ICT & IoT (HONET-ICT)* (pp. 92–96). <https://doi.org/10.1109/HONET.2018.8551341>
- Shepley, M. G., Schmidt, N., Senior, M. J., Worthington, S. R. H., & Scheckenberger, R. B. (2020). Assessing “Urban Karst” Effects from Groundwater – Storm Sewer System Interaction in a Till Aquitard. *Groundwater*, 58(2), 269–277. <https://doi.org/10.1111/gwat.12908>
- Shi, W., & Dustdar, S. (2016). The promise of edge computing. *Computer*, 49(5), 78–81.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges.

IEEE Internet of Things Journal, 3(5), 637–646.

- Shuster, W. D., & Darner, R. A. (2018). *Hydrologic performance of retrofit rain gardens in a residential neighborhood (Cleveland Ohio USA) with a focus on monitoring methods*. EPA/600/R-18/191. Washington, D.C. Retrieved from www.epa.gov/research
- Slosson, J.R., Lautz, L.K., Beltran, J. 2021. Chloride load dynamics along channelized and intact reaches in a northeastern United States urban headwater stream. *Environmental Research Letters* 16(2),025001
- Snodgrass, J. W., Moore, J., Lev, S. M., Casey, R. E., Ownby, D. R., Flora, R. F., & Izzo, G. (2017). Influence of Modern Stormwater Management Practices on Transport of Road Salt to Surface Waters. *Environmental Science and Technology*, 51(8), 4165–4172. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03107>
- Sokac, M. (2019). Water Balance in Urban Areas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471(4), 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/4/042028>
- Spahr, S., Teixidó, M., Sedlak, D. L., & Luthy, R. G. (2020). Hydrophilic trace organic contaminants in urban stormwater: Occurrence, toxicological relevance, and the need to enhance green stormwater infrastructure. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 6(1), 15–44. <https://doi.org/10.1039/c9ew00674e>
- Steis Thorsby, J., Miller, C. J., & Treemore-Spears, L. (2020). The role of green stormwater infrastructure in flood mitigation (Detroit, MI USA) – case study. *Urban Water Journal*, 17(9), 838–846. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1823429>
- Stewart, R. D., Lee, J. G., Shuster, W. D., & Darner, R. A. (2017). Modelling hydrological response to a fully-monitored urban bioretention cell. *Hydrological Processes*, 31, 4626–4638. <https://doi.org/10.1002/hyp.11386>
- von der Tann, L., Metje, N., Admiraal, H., & Collins, B. (2018). The hidden role of the subsurface for cities. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering*, 171(6), 31–37. <https://doi.org/10.1680/jcien.17.00028>
- The Regional Municipality of York. (2011). Inflow and Infiltration Reduction Strategy. [Inflow_and_Infiltration_Reduction_Strategy.pdf \(york.ca\)](#)
- The Regional Municipality of York. (2020). [2019 Inflow and Infiltration Reduction Annual Report](#). (Accessed June 23, 2021)
- Thom, J. K., Szota, C., Coutts, A. M., Fletcher, T. D., & Livesley, S. J. (2020). Transpiration by established trees could increase the efficiency of stormwater control measures. *Water Research*, 173, 115597. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115597>
- Thorndahl, S., Balling, J. D., & Larsen, U. B. B. (2016). Analysis and integrated modelling of groundwater infiltration to sewer networks. *Hydrological Processes*, 30(18), 3228–3238. <https://doi.org/10.1002/hyp.10847>
- Toronto and Region Conservation Authority. 2019. Procurement Guidance for Parking Lot

Snow and Ice Management, Version 2.0. January 2019. [Microsoft Word - Procurement Guidance v2.0.docx \(sustainabletechnologies.ca\)](#)

- Tovilla, E. (2020). Mind the gap: Management system standards addressing the gap for ontario's municipal drinking water, wastewater and stormwater ecosystem of regulations. *Sustainability (Switzerland)*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/su12177099>
- Tovilla, E., & Webb, K. (2017). Examining the emerging environmental protection policy convergence in the Ontario municipal drinking water, wastewater and stormwater sectors. *Water Quality Research Journal of Canada*, 52(3), 209–228. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2017.043>
- Tsegaye, S., Singleton, T. L., Koeser, A. K., Lamb, D. S., Landry, S. M., Lu, S., et al. (2019). Transitioning from gray to green (G2G)—A green infrastructure planning tool for the urban forest. *Urban Forestry and Urban Greening*, 40, 204–214. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.09.005>
- Tubau, I., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Valhondo, C., & Criollo, R. (2017). Quantification of groundwater recharge in urban environments. *Science of the Total Environment*, 592, 391–402. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.118>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2019). *Toxics Release Inventory (TRI) 2019 National Analysis*. Retrieved from <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2017). Addition of a Subsurface Intrusion Component to the Hazard Ranking System, 82 Fed. Reg. 5 (to be codified at 40 CFR Part 300). Retrieved from <https://www.federalregister.gov/d/2016-30640>
- U.S. Environmental Protection Agency. 2014. Guide for Estimating Infiltration and Inflow. June 2014. [Guide for Estimating Infiltration and Inflow, June 2014 \(epa.gov\)](#)
- U.S. Geological Survey. (2017). GLRI Urban Stormwater Monitoring. Retrieved from https://wim.usgs.gov/geonarrative/GLRI_urban_stormwater/
- Uejio, C. K., Christenson, M., Moran, C., & Gorelick, M. (2017). Drinking-water treatment, climate change, and childhood gastrointestinal illness projections for northern Wisconsin (USA) communities drinking untreated groundwater. *Hydrogeology Journal*, 25(4), 969–979.
- Vaillancourt, C., Duchesne, S., Ph, D., Pelletier, G., & Ph, D. (2019). Hydrologic Performance of Permeable Pavement as an Adaptive Measure in Urban Areas: Case Studies near Montreal, Canada. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(2003), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001812](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001812)
- de Ville, N., Le, H. M., Schmidt, L., & Verbanck, M. A. (2017). Data-mining analysis of in-sewer infiltration patterns: seasonal characteristics of clear water seepage into Brussels main sewers. *Urban Water Journal*, 14(10), 1090–1096. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1363252>

- Voisin, J., Cournoyer, B., Vienney, A., & Mermillod-Blondin, F. (2018). Aquifer recharge with stormwater runoff in urban areas: Influence of vadose zone thickness on nutrient and bacterial transfers from the surface of infiltration basins to groundwater. *Science of The Total Environment*, 637–638, 1496–1507. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.094>
- Vystavna, Y., Diadin, D., Rossi, P.M., Gusyev, M., Hejzlar, J., Mehdzadeh, R., Huneau, F. 2018. Quantification of water and sewage leakages from urban infrastructure into a shallow aquifer in East Ukraine. *Environmental Earth Sciences* 77:748.
- Warner, K., Howard, K., Gerber, R., Soo Chan, G., & Ford, D. (2016). Chapter 6. Effects of urban development on groundwater. In G. Grannemann & D. Van Stempvoort (Eds.), *Groundwater science relevant to the Great Lakes Water Quality Agreement: A status report*. Environment and Climate Change Canada and U.S. Environmental Protection Agency..<https://binational.net/2016/06/13/groundwater-science-f/>
- Warner, W., Licha, T., & Nödler, K. (2019). Qualitative and quantitative use of micropollutants as source and process indicators. A review. *Science of the Total Environment*, 686, 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.385>
- Watanabe, R., & Harada, H. (2019). Exfiltration and infiltration effect on sewage flow and quality: a case study of Hue, Vietnam. *Environmental Technology*. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1680739>
- Weekes, K., Krantzberg, G., & Vizeu Pinheiro, M. (2019). Identifying the groundwater sustainability implications of water policy in high-use situations in the Laurentian Great Lakes Basin. *Canadian Water Resources Journal*, 44(4), 337–349. <https://doi.org/10.1080/07011784.2019.1623079>
- White, D., Lapworth, D. J., Stuart, M. E., & Williams, P. J. (2016). Hydrochemical profiles in urban groundwater systems: New insights into contaminant sources and pathways in the subsurface from legacy and emerging contaminants. *Science of the Total Environment*, 562, 962–973. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.054>
- Winston, R. J., Dorsey, J. D., & Hunt, W. F. (2016). Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. *Science of the Total Environment*, 553, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.081>
- Winston, R. J., Arend, K., Dorsey, J. D., Johnson, J. P., & Hunt, W. F. (2020). Hydrologic Performance of a Permeable Pavement and Stormwater Harvesting Treatment Train Stormwater Control Measure. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 6(1), 04019011. <https://doi.org/10.1061/jswbay.0000889>
- Wirion, C., Bauwens, W., & Verbeiren, B. (2019). Using remote sensing based metrics to quantify the hydrological response in a city. *Water*, 11, 1763. <https://doi.org/10.3390/w11091763>
- Wong, B. P., & Kerkez, B. (2018). Real-Time Control of Urban Headwater Catchments

Through Linear Feedback: Performance, Analysis, and Site Selection. *Water Resources Research*, 54(10), 7309–7330. <https://doi.org/10.1029/2018WR022657>

Wyman, D. A., & Koretsky, C. M. (2018). Effects of road salt deicers on an urban groundwater-fed kettle lake. *Applied Geochemistry*, 89, 265–272. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.12.023>

Yang, L., Qi, Y., Zheng, C., Andrews, C. B., Yue, S., Lin, S., et al. (2018). A modified water-table fluctuation method to characterize regional groundwater discharge. *Water*, 10(4), 503.

Zhang, K., & Chui, T. F. M. (2018). Interactions between shallow groundwater and low-impact development underdrain flow at different temporal scales. *Hydrological Processes*, 32(23), 3495–3512. <https://doi.org/10.1002/hyp.13272>

Zhang, K., & Chui, T. F. M. (2019). Effect of Spatial Allocation of Green Infrastructure on Surface-Subsurface Hydrology in Shallow Groundwater Environment. In *World Environmental and Water Resources Congress 2019* (pp. 147–152). <https://doi.org/doi:10.1061/9780784482360.015>

Zhao, Z., Yin, H., Xu, Z., Peng, J., & Yu, Z. (2020). Pin-pointing groundwater infiltration into urban sewers using chemical tracer in conjunction with physically based optimization model. *Water Research*, 175, 115689. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115689>



L'épandage excessif courant de sel de déglacage sur les trottoirs et les routes peut entraîner une contamination des eaux souterraines, qui peuvent ensuite se déverser dans les cours d'eau (et les milieux humides et les lacs) à proximité, ce qui entraîne des concentrations élevées de sel pendant les périodes de débit de base, même pendant l'été.

Crédit photo: James Roy, Environnement et Changement climatique Canada

7 EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES EAUX SOUTERRAINES

Diogo Costa¹, Helen Zhang², Jana Levison³

*¹ Environnement et Changement climatique Canada, Saskatoon, SK, Canada
(maintenant en Universidade de Évora)*

² Ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature et des Parcs, Toronto, ON, Canada

³ Université de Guelph, Morwick G360 Groundwater Research Institute, Guelph, ON, Canada

7.1 Introduction

Les changements climatiques peuvent modifier les propriétés physiques et chimiques des eaux du bassin des Grands Lacs (BGL) ainsi que leurs fonctions écologiques. Le présent chapitre résume les recherches existantes portant sur les effets potentiels d'un climat changeant sur la qualité (y compris la température) des eaux souterraines et sur la quantité d'eau souterraine dans le bassin des Grands Lacs. Il comprend une analyse des effets déjà constatés et des effets prévus.

Les recherches montrent une grande variabilité spatiale (régionale) et temporelle (c. à d. saisonnière) dans la réponse des eaux souterraines aux changements climatiques. La plupart des études combinent des observations sur le terrain et des modèles, et plusieurs portent uniquement sur des bassins de petite ou moyenne taille. Bien que les recherches soient limitées, elles montrent qu'à ces échelles, les réseaux d'eau souterraine de cette région devraient être relativement résilients face aux effets des changements climatiques. Les études de modélisation portant sur des bassins plus étendus (p. ex. rivière Grand, baie Saginaw et rivière Maumee) prévoient une augmentation des réserves d'eau souterraine, mais la sensibilité de ces eaux aux changements climatiques semble dépendre fortement des caractéristiques physiographiques locales. L'incertitude des simulations issues de modèles, en particulier des modèles climatiques utilisés pour forcer les modèles hydrologiques, constitue un défi majeur. Les études menées à ce jour sur l'interaction entre les changements climatiques et la qualité des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs sont trop peu nombreuses pour permettre de tirer des conclusions sur la qualité et l'écohydrologie futures des eaux souterraines.

Le présent résumé est axé sur ce que l'on sait des effets des changements climatiques dans le BGL en ce qui concerne : (1) l'alimentation des eaux souterraines, (2) les réserves d'eau souterraine, (3) l'émergence d'eau souterraine et l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface, (4) l'aggravation des répercussions du développement urbain futur sur les eaux souterraines, (5) la qualité des eaux souterraines, et (6) l'écohydrologie (y compris la qualité des eaux de surface). Les principales constatations sont résumées ci-dessous et

sont suivies d'une revue plus approfondie de la littérature. Un résumé des méthodes, des modèles et des technologies qui ont été utilisés pour étudier le sujet dans le BGL est également présenté. L'incertitude des modèles est un enjeu de plus en plus important, et elle est également abordée. Le rapport se termine par une synthèse des principaux besoins scientifiques à combler pour mieux comprendre les effets des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans le BGL.

7.2 Résumé (principales constatations)

Alimentation des eaux souterraines:

La plupart des études sur l'alimentation des eaux souterraines et les effets des changements climatiques dans le bassin des Grands Lacs ont été menées à l'échelle d'un bassin de petite ou moyenne taille. Les résultats des simulations montrent d'importantes variations spatiales et temporelles (c. à d. saisonnières) entre les zones d'étude. Certaines études ont fait état d'une augmentation générale de l'alimentation annuelle des eaux souterraines, mais elles ont également permis de constater une importante variabilité saisonnière (c. à d. une augmentation significative en hiver et une légère diminution en été). D'autres études menées à l'échelle d'un petit bassin prévoient une augmentation ou une diminution globale de l'infiltration et de l'alimentation des eaux souterraines. L'une des principales études menées à l'échelle d'un grand bassin hydrographique a révélé que les caractéristiques physiographiques locales influent fortement sur l'ampleur des effets des changements climatiques sur les eaux souterraines, et que les régions où la nappe phréatique est plus profonde y étaient plus sensibles. En outre, les changements les plus importants dans les niveaux d'eau souterraine, l'alimentation des eaux souterraines et l'humidité du sol se produisaient généralement dans ces régions, ce qui laisse supposer la présence d'effets cumulatifs. Les changements importants observés dans l'hydrologie de la fonte des neiges entre les années historiquement « chaudes » et « froides » ont également été associés à des changements saisonniers considérables dans la dynamique de l'écoulement et de l'alimentation des eaux souterraines. Pour la première fois, un modèle hydrologique eaux de surface–eaux souterraines entièrement intégré a été mis en place pour le Canada continental afin de quantifier l'effet des changements climatiques sur les réseaux d'écoulement souterrain. Cependant, la modélisation climatique est devenue une source majeure d'incertitude, et l'utilisation d'ensembles de modèles et de scénarios climatiques pour forcer les simulations hydrologiques est une recommandation clé que plusieurs études ont mise de l'avant.

Quantité d'eau souterraine (changements dans les réserves):

Des données de terrain et des modèles ont été utilisés pour étudier l'effet des changements climatiques sur les réserves d'eau souterraine à une vaste gamme d'échelles spatiales (allant du terrain au continent) et dans de nombreux lieux géographiques. Toutefois, plusieurs des études en question ont été menées à l'échelle d'un terrain ou d'un bassin de petite ou moyenne taille. Malgré la variabilité des résultats obtenus à ces échelles, plusieurs études ont conclu que les réseaux d'eau souterraine devraient être relativement résilients face aux effets des changements climatiques. Il reste que certaines études portaient

uniquement sur l'alimentation des eaux souterraines ou l'émergence d'eau souterraine et n'abordaient pas directement les changements dans les réserves. On a signalé l'incertitude des modèles ainsi que la variabilité spatiale de l'effet cumulé des changements climatiques et de l'intensification du prélèvement d'eau souterraine pour l'agriculture à l'échelle régionale. Toutefois, les études tendent à prévoir une possible augmentation locale du débit de base qui dépendrait de facteurs comme le type d'aquifère (captif ou libre). Les études portant sur de grands bassins (p. ex. rivière Grand, baie Saginaw et rivière Maumee) prévoient généralement une augmentation des réserves d'eau souterraine, mais elles montrent aussi que la sensibilité des eaux souterraines aux changements climatiques dépend fortement des caractéristiques physiographiques locales, et l'incertitude des simulations des modèles y est souvent soulignée. Les projections de modèles à l'échelle continentale sont rares, n'en sont qu'à leurs débuts, et sont incertaines au Canada, notamment en ce qui concerne leurs implications pour les Grands Lacs. Un modèle a permis de bien rendre le drainage de surface dans la majeure partie du Canada, mais sa performance se détériorait dans les régions de l'Arctique et des Grands Lacs. Les auteurs ont attribué ceci à l'incertitude des précipitations observées et ont recommandé d'améliorer la climatologie d'observation dans ces régions. Les données historiques ont aussi souvent été utilisées pour examiner la réponse des systèmes hydrologiques aux changements des conditions climatiques. Par exemple, une analyse fondée sur des données de surveillance au sol et de télédétection a révélé que l'augmentation des réserves d'eau terrestres au cours de la dernière décennie était principalement due à des changements dans les eaux souterraines peu profondes (c. à d. la zone vadose et les aquifères libres).

Résurgence d'eau souterraine et interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface :

À l'instar des études précédentes sur l'alimentation des eaux souterraines et les réserves d'eau souterraine, les études récentes sur l'émergence d'eau souterraine et l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface soulignent l'importance de quantifier et de réduire les incertitudes liées aux simulations climatiques et hydrologiques. Alors que certaines études indiquent qu'il devrait y avoir, d'ici le milieu du siècle, une réduction potentiellement importante de l'émergence d'eau souterraine et aucune modification substantielle du niveau des eaux souterraines ou du flux d'échange net, d'autres prévoient qu'il devrait y avoir, d'ici la fin du siècle, une augmentation considérable des charges hydrauliques et des débits d'eau en hiver et une légère diminution de ces variables en été. Toutefois, les chercheurs qui étudient l'émergence des eaux de drainage souterrain fournissent des prévisions contradictoires (c. à d. une réduction ou une augmentation significative de cette émergence) d'ici la fin du siècle.

Aggravation des répercussions du développement urbain futur sur les eaux souterraines :

Les études portant sur les répercussions du développement urbain sur la quantité d'eau souterraine et la qualité des eaux souterraines sont rares. Une évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques des sources d'eau potable (eaux de surface et eaux

souterraines) au Canada a révélé que pour toutes les études de cas, ces sources étaient fortement exposées aux changements climatiques à travers les saisons et les années, mais que l'incertitude de l'évaluation de l'exposition était élevée en raison de l'utilisation de données modélisées. Une étude réalisée dans la région du Grand Chicago a montré que l'augmentation de la demande d'eau a entraîné une extraction non durable d'eau souterraine dans le bassin du lac Michigan ainsi qu'une augmentation artificielle du débit de base, ce qui a eu pour effet d'atténuer la réduction de l'infiltration et du débit de base par les surfaces imperméables. Les installations de gestion des eaux pluviales et les mesures d'atténuation des inondations ont toutefois permis d'atténuer ces répercussions à différentes échelles spatiales.

Qualité des eaux souterraines:

Les changements climatiques peuvent avoir une incidence sur la qualité des eaux souterraines par le biais de divers mécanismes liés aux modifications de processus hydrologiques comme l'alimentation des eaux souterraines et les réserves et l'émergence d'eau souterraine ainsi qu'aux variations de la température de l'eau et à l'évolution des pratiques anthropiques. Les études menées à ce jour sur l'interaction entre les changements climatiques et la qualité des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs sont trop peu nombreuses pour permettre de tirer des conclusions sur la qualité future des eaux souterraines. Ce sujet doit donc faire l'objet d'une étude plus approfondie dans cette région. L'accent devrait être mis sur l'examen de différents types de contaminants (p. ex. de source ponctuelle et de source diffuse, d'origine anthropique et d'origine géogénique). Les études de modélisation intégrée, de même que les évaluations de la vulnérabilité, sont utiles pour étudier les concentrations futures des contaminants des eaux souterraines et les risques connexes en vue d'une meilleure gestion des terres et de l'eau.

Écohydrologie (incluant la qualité des eaux de surface):

On s'attend à ce que les écosystèmes dépendant des eaux souterraines (EDES) soient touchés par les changements climatiques par le biais des modifications prévues du bilan hydrique (attribuables p. ex. aux sécheresses ayant une incidence sur le niveau des eaux souterraines, la quantité d'eau émergente et le moment de l'émergence) et de la qualité de l'eau (p. ex. sources de contaminants nouvelles ou variées, modifications du transport des contaminants et transformations géochimiques, modifications de la température). Très peu d'études ont porté sur l'écohydrologie liée aux réseaux d'eau souterraine et aux changements climatiques dans le bassin des Grands Lacs. Pour aller de l'avant, une approche multidisciplinaire est nécessaire. Des données écologiques, hydrologiques et géomorphologiques devraient être recueillies à l'échelle de l'écosystème pour compléter les programmes de surveillance hydrologique habituels. En outre, des modèles entièrement intégrés représentant explicitement l'écoulement souterrain, le transport des contaminants et les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface sont nécessaires, et ils doivent être utilisés à une échelle spatiale et temporelle suffisamment fine pour être pertinents pour les processus écohydrologiques. Une compréhension technique détaillée des problèmes potentiels est nécessaire pour faciliter l'élaboration de règlements en

matière d'utilisation des terres en vue de protéger les EDES dans le contexte des changements climatiques.

Incertitude des modèles:

Le problème de l'incertitude des modèles est mis en évidence dans presque toutes les études qui ont fait appel à la modélisation. Certaines études présentent une moyenne des résultats de plusieurs modèles de circulation générale (MCG) ayant fait l'objet d'une réduction d'échelle statistique afin d'obtenir une projection plus robuste que celles issues d'un seul MCG. D'autres études démontrent l'importance du couplage entre les modèles climatiques régionaux (MCR) et les modèles lacustres pour saisir l'influence de la région sur le bilan hydrique printanier et estival. Le forçage climatique lié aux MCG et aux scénarios d'émissions du GIEC est généralement reconnu comme la principale source d'incertitude, mais la représentation de l'hétérogénéité dans les modèles hydrologiques est également considérée comme un défi majeur. La sous représentation des processus saisonniers de gel et de dégel du sol est également considérée comme un problème majeur dans de nombreux modèles. De nombreuses études soulignent l'importance de disposer de données de surveillance plus nombreuses et à plus long terme pour caractériser toutes les composantes climatiques et hydrologiques ainsi que les profils de température du sol. En outre, trop peu d'études ont utilisé une approche similaire ou cohérente qui permet de comparer facilement ou efficacement les résultats des simulations.

7.3 Revue de la littérature

7.3.1. Alimentation des eaux souterraines

Les études récentes portant sur les effets futurs des changements climatiques sur l'alimentation des eaux souterraines ont principalement été menées à l'échelle d'un terrain ou d'un bassin hydrographique. Les quelques études menées à l'échelle d'un bassin étendu (ou à l'échelle continentale) tendent à être axées sur la compréhension de la réponse globale des systèmes hydrologiques aux régimes climatiques observés.

Échelle d'un terrain ou d'un bassin de petite ou moyenne taille (< 500 km²)

La plupart des études de bassins de petite ou moyenne taille ont été menées dans la région du sud-ouest de l'Ontario (p. ex., Brouwers, 2008; Larocque et al., 2019; Motiee et McBean, 2017; Sultana et Coulibaly, 2011). Les variables climatiques utilisées dans ces études ont généralement été obtenues à l'aide de MCG et de modèles régionaux ayant fait l'objet d'une réduction d'échelle statistique pour différentes périodes futures allant jusqu'à la fin du 21^e siècle. Ces variables climatiques ont ensuite été utilisées pour forcer des modèles hydrologiques couplés, comme le SWAT MODFLOW (Larocque et al., 2019), le HELP3 HydroGeoSphere (Brouwers, 2008) et le Mike SHE Mike 11 (Sultana et Coulibaly, 2011), ou (selon les objectifs de l'étude) un seul modèle d'infiltration comme le VisualHELP (Jyrkama et Sykes, 2007).

Les résultats des simulations montrent des variations spatiales et temporelles (c.-à-d. saisonnières) distinctives entre les zones d'étude. Larocque et al. (2019) ont étudié un sous

bassin versant du cours inférieur du ruisseau Whiteman's, et ont prédit que l'ensemble du réseau d'eau souterraine sera relativement résilient face aux effets des changements climatiques à l'avenir (c. à d. qu'il n'y aura pas de changements radicaux dans le niveau des eaux souterraines), notamment par suite de l'alimentation, de l'écoulement et du débit de base accrus et du niveau plus élevé des eaux souterraines en hiver et en automne. Par ailleurs, l'alimentation et l'écoulement des eaux souterraines devraient diminuer pendant la période de végétation. Motiee et McBean (2017) ont également prédit, pour le secteur de Guelph du bassin versant de la rivière Grand, une augmentation de l'infiltration et de l'alimentation des eaux en hiver en raison des effets de gel dégel plus fréquents et plus prononcés, ainsi que l'effet inverse (diminution de l'infiltration et de l'alimentation des eaux) en été en raison de l'évaporation. Brouwers (2008) a révélé l'effet important du climat sur le moment où ont lieu les processus hydrologiques dans le secteur du ruisseau Alder. Une fonte printanière des neiges qui se produit plus tôt dans l'année peut entraîner une diminution globale du ruissellement et une augmentation de l'infiltration, et ce, tant dans des scénarios climatiques futurs plus secs que dans des scénarios plus humides. Toutefois, on s'attend à ce que ces changements soient plus prononcés dans le réseau d'eau de surface que dans les eaux souterraines. Les résultats semblent également indiquer qu'il y aura une augmentation de l'évapotranspiration (ET), en particulier durant les mois d'été, une augmentation de l'alimentation des eaux (de 0,36 à 4,12 mm) et une légère élévation du niveau moyen de la nappe phréatique.

Sultana et Coulibaly (2011) ont montré qu'au ruisseau Spencer, en Ontario, il devrait y avoir une diminution des réserves annuelles de neige (de 15 %) et de l'alimentation annuelle des eaux souterraines (de 0,56 %), et une augmentation de l'ET annuelle (de 110 %) et du débit du cours d'eau (de 1025 %). Ils ont attribué ces effets à l'augmentation des précipitations moyennes annuelles (de 1417 %) et des températures maximale et minimale moyennes annuelles (de 23 °C) prévue par le modèle climatique.

Grands bassins (> 500 km²)

Les changements dans les éléments du bilan hydrique et les réserves d'eau attribuables aux variables climatiques ont été évalués pour les bassins versants de la rivière Grand et de la baie Saginaw dans l'État du Michigan (Niu et al., 2014). Aucun modèle climatique n'a été utilisé, mais on a eu recours à des observations climatiques effectuées entre 2000 et 2012 pour forcer le modèle PAWS, un modèle hydrologique fondé sur les processus (Shen et Phanikumar, 2010), afin de simuler différents éléments hydrologiques, dont les eaux souterraines. La dynamique de croissance de la végétation a été prise en compte en couplant le modèle PAWS au modèle de surface terrestre CLM (Lawrence et al., 2019). L'analyse des tendances a montré que les réserves d'eau ont augmenté dans les deux bassins hydrologiques au cours de la dernière décennie, principalement en raison de changements dans la zone vadose et dans l'aquifère libre, et non en raison de changements dans les eaux de surface ou dans l'aquifère captif. Cependant, il convient de noter que ce modèle a été établi à l'aide d'une hydrostratigraphie très simplifiée fondée sur 2 couches, une séquence qui a été représentée par d'autres comme comportant 17 couches (Feinstein et al., 2010).

La réduction des incertitudes associées à la modélisation du climat est devenue l'un des principaux enjeux examinés dans les études récentes. Cet enjeu est principalement abordé en utilisant des ensembles de modèles et de scénarios climatiques pour forcer les simulations hydrologiques (Colautti, 2010; Erler et al., 2019b; Paradis et al., 2016). Par exemple, Erler et al. (2019 b) ont constaté que des configurations de MCR utilisant différents schémas physiques de l'humidité généraient des résultats de simulation considérablement différents, et que l'incertitude principale était associée aux précipitations estivales futures. Les changements dans les régimes estivaux devraient influencer sur le cycle hydrologique saisonnier et annuel. Dans le scénario climatique plus sec, le niveau et l'alimentation des eaux souterraines pourraient diminuer, tandis que dans le scénario plus humide, le niveau et l'alimentation de ces eaux resteraient probablement inchangés d'ici la fin du siècle.

Erler et al. (2019 b, a) et Colautti (2010) ont appliqué l'HydroGeoSphere (HGS; Therrien et al., 2010), un modèle hydrologique entièrement intégré, au bassin versant de la rivière Grand (6 800 km²) dans le sud de l'Ontario. Erler et al. (2019 b, a) ont couplé des projections climatiques ayant fait l'objet d'une réduction d'échelle dynamique avec le modèle HGS afin d'évaluer les effets des changements climatiques sur les eaux souterraines et l'humidité du sol dans les conditions climatiques normales mensuelles. Il s'agit de la première étude du genre réalisée dans la région des Grands Lacs qui montre que le climat local est fortement influencé par d'importants plans d'eau de surface. Dans leur étude, des modèles de recherche et de prévision météorologique (WRF) ayant deux configurations physiques différentes de l'humidité (WRF T, de configuration plus « sèche », et WRF G, de configuration plus « humide ») ont été utilisés à une résolution de 10 km pour forcer un modèle intégré eaux de surface–eaux souterraines à une échelle sous kilométrique. Les résultats ont révélé que les caractéristiques physiographiques locales influaient fortement sur l'ampleur des effets des changements climatiques sur les eaux souterraines. Les régions où la nappe phréatique est profonde (c. à d. où elle se trouve à plus de 2 m sous la surface du sol) sont plus sensibles aux changements du climat; les variations les plus importantes touchent les niveaux d'eau souterraine, l'alimentation des eaux souterraines et l'humidité du sol, ce qui pourrait indiquer la présence d'effets cumulatifs. Colautti (2010) a prédit que d'ici le milieu du siècle, il y aurait des changements dans l'alimentation des eaux souterraines pouvant aller de -5 % à 22 %, mais il n'y aurait aucune augmentation de l'ET. Ses simulations étaient purement synthétiques et limitées à l'état d'équilibre.

L'alimentation des eaux souterraines en réponse aux conditions climatiques historiques a également été évaluée pour l'État du Michigan (Ford et al., 2020). Dans cette étude, les années récentes (de 2003 à 2017) ont été classées dans les catégories « chaude » ou « froide » en se fondant sur de multiples paramètres calculés à partir d'une réanalyse combinée de modèles et de données ainsi que sur des observations provenant de plusieurs sources concernant les précipitations, la température ainsi que l'équivalent en eau quotidien et le rythme de fonte du manteau neigeux. Les auteurs ont constaté que les débits de pointe printaniers plus faibles et plus précoces qui se produisent lors des années chaudes dans les cours d'eau étaient associés à une réduction de l'alimentation nette des eaux souterraines dans les régions du nord de l'État. Le passage d'une année « chaude » à une année « froide » et inversement se traduisait par des différences dans la dynamique

d'écoulement et d'alimentation des eaux souterraines, mais aucun effet direct sur les réserves d'eau souterraine n'a pu être établi.

Échelle continentale

La zone d'étude de Chen et al. (2020) s'étend sur tout le bassin continental du Canada (10,5 millions de km²), de l'océan Pacifique à l'océan Atlantique et des régions du nord des États américains contigus à l'océan Arctique et à l'Alaska. Un modèle hydrologique tridimensionnel entièrement intégré, fondé sur la physique, a été créé à l'aide de la plateforme de simulation HGS. Ce modèle hydrologique a été forcé à l'aide d'un ensemble de données climatiques maillées observées (de 1981 à 2010) et a permis de comparer les observations sur le niveau d'eau des lacs et sur l'écoulement fluvial. Les auteurs ont calculé que l'alimentation des eaux souterraines dans l'ensemble du Canada continental s'élevait à 201 mm/an en moyenne, ce qui correspond à 36 % des précipitations totales et se traduit par un indice de débit de base de 0,7. Cette estimation se situe dans le haut de la fourchette des valeurs publiées dans les études menées à l'échelle régionale au Canada, mais elle concorde avec les valeurs publiées dans les études menées à l'échelle continentale. L'étude a révélé que les réseaux d'écoulement souterrain à grande échelle jouaient un rôle important dans la disponibilité de l'eau douce au Canada, et donc que les effets potentiels des changements climatiques sur ces réseaux régionaux pourraient avoir des conséquences réelles sur la disponibilité des eaux souterraines et des eaux de surface

7.3.2. Quantité d'eau souterraine (changements dans les réserves)

Des données de terrain et des modèles ont été combinés pour étudier l'effet des changements climatiques sur les réserves d'eau souterraine dans de nombreux lieux géographiques et à une vaste gamme d'échelles spatiales. Parmi ces études figurent des études menées à l'échelle d'un terrain ou d'un bassin de petite ou moyenne taille (Larocque et al., 2019; Persaud et al., 2020; Brouwers, 2008; Saleem et al., 2020; Motiee et McBean, 2017; Sultana et Coulibaly, 2011; Pease et al., 2017), des études portant sur une province ou un État (Borchardt, 2019; Mehan et al., 2019; Croley II et Luukkonen, 2003; Ford et al., 2020), et des études de modélisation portant sur de grands bassins (Erler et al., 2019b; Niu et al., 2014; Colautti, 2010; Kujawa et al., 2020) et sur le Canada continental (Chen et al., 2020).

Échelle d'un terrain ou d'un bassin de petite ou moyenne taille (< 500 km²)

La plupart des études font état de résultats à l'échelle d'un terrain ou d'un bassin de petite ou moyenne taille. Malgré la variabilité des résultats, plusieurs études menées à ces échelles ont conclu que les réseaux d'eau souterraine devraient être relativement résilients face aux effets des changements climatiques (Larocque et al., 2019; Persaud et al., 2020; Brouwers, 2008). Toutefois, certaines études portaient uniquement sur l'alimentation des eaux souterraines ou l'émergence d'eau souterraine et n'abordaient pas directement les changements dans les réserves (p. ex., Motiee et McBean, 2017; Sultana et Coulibaly, 2011; Pease et al., 2017). Larocque et al. (2019) ont simulé un sous bassin de 65 km² du cours

inférieur du ruisseau Whiteman's, dans le bassin du lac Érié dans le sud ouest de l'Ontario, à l'aide de trois scénarios (issus de MCG et du CMIP5) dérivés d'une analyse par regroupement de 22 scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5). Ils ont utilisé le SWAT MODFLOW pour obtenir des simulations intégrées eaux souterraines–eaux de surface pour des périodes historiques (de 1970 à 2000) et futures (de 2040 à 2070). Ils ont conclu que le réseau d'eau souterraine devrait être relativement résilient face aux effets des changements climatiques. Ils ont fait valoir qu'il existe plusieurs possibilités d'utilisation de l'eau (comme une augmentation du pompage pour l'irrigation) découlant de l'augmentation globale de la disponibilité de l'eau à l'avenir. Toutefois, pour les bassins hydrographiques subissant déjà la pression exercée par l'irrigation, comme celui ci, le calendrier de la disponibilité future de l'eau par rapport aux moments critiques associés à la production agricole pourrait poser problème. En effet, les auteurs ont prédit qu'il y aura plus d'eau disponible (augmentation de l'alimentation, de l'écoulement, du débit de base et du niveau des eaux souterraines) dans le bassin versant en hiver et en automne, mais que l'alimentation et l'écoulement des eaux souterraines seraient réduits en été, qui est une période critique pour les cultures. Ils ont recommandé une surveillance à long terme de tous les éléments hydrologiques afin de mieux comprendre les bassins versants soumis à un stress et la façon dont ils peuvent être touchés par les changements climatiques.

Persaud et al. (2020) ont examiné le bassin versant du cours supérieur du ruisseau Parkhill (130 km²), dans le bassin du lac Huron dans le sud ouest de l'Ontario, à l'aide du modèle HGS (simulation intégrée eaux souterraines–eaux de surface). Ils ont utilisé trois MCR (RegCM 4 et RCP 8.5), deux ensembles de modèles WRF, un scénario synthétique fondé sur les prévisions du 5e rapport d'évaluation du GIEC et des analogues temporels fondés sur les conditions climatiques historiques. La période de référence historique se situait entre 1986 et 2005, et la période future, entre 2040 et 2059. Les auteurs ont prédit une variabilité à la fois dans la direction et dans l'ampleur des changements hydrologiques prévus; ils ont donc effectué une interprétation probabiliste des résultats pour tenir compte de l'incertitude des projections climatiques. Les simulations indiquaient une grande probabilité de réduction significative de l'émergence d'eau souterraine au milieu du siècle, et un changement moins important du niveau des eaux souterraines ou du flux d'échange net. Brouwers (2008) a combiné le modèle HELP3 simulant les processus liés aux eaux de surface et à la zone vadose avec le modèle HydroGeoSphere simulant l'écoulement souterrain en milieu saturé dans le sous bassin du ruisseau Alder (80 km²) du bassin du lac Érié dans le sud ouest de l'Ontario. Des facteurs d'échelle dérivés de la deuxième génération du modèle canadien de circulation générale (MCCG2) ont été appliqués aux valeurs de référence des précipitations, de la température et du rayonnement solaire entrant afin d'évaluer les effets des changements climatiques. La période de référence se situait entre 1960 et 2000, et la période future, entre 2020 et 2080. L'auteur a prédit une légère élévation du niveau de la nappe phréatique future malgré une fonte printanière des neiges plus précoce, une diminution du ruissellement et une augmentation de l'infiltration, tant pour les scénarios plus secs que pour les scénarios plus humides, ainsi qu'une augmentation de l'évapotranspiration en été. Cependant, une étude menée dans le sous bassin versant de la rivière Lynn (155 km²) du bassin du lac Érié dans le sud-ouest de

l'Ontario prévoit que le débit de la rivière et le niveau des eaux souterraines seront plus bas à l'avenir, ce qui indique une baisse de la disponibilité de l'eau (Saleem et al., 2020).

Études provinciales

Des recherches menées à l'échelle régionale montrent l'incertitude et la variabilité spatiale de l'effet cumulé des changements climatiques et de l'intensification du prélèvement d'eau souterraine pour l'agriculture. Toutefois, une augmentation locale du débit de base qui dépendrait de facteurs comme le type d'aquifère (captif ou libre) pourrait se produire. Par exemple, Croley II et Luukkonen (2003) ont étudié la dynamique historique et future des réserves de l'aquifère de Saginaw dans le secteur de Lansing, au Michigan, au moyen du système de modélisation hydrologique du Great Lakes Environmental Research Laboratory en utilisant des estimations météorologiques pour la période de 1961 à 1990 (conditions de référence) et pour les 20 années centrées sur 2030 (nouvelles conditions climatiques). Deux estimations météorologiques ont été utilisées, l'une du Centre climatologique canadien et l'autre du Hadley Centre. Les résultats montrent des effets contradictoires du climat futur, selon le forçage météorologique. Les niveaux d'eau souterraine baissaient selon les prévisions canadiennes, mais ils augmentaient selon celles du Hadley Centre. Il convient de noter que cette recherche en particulier a eu lieu avant que les progrès considérables des 18 dernières années dans la compréhension de la dynamique du climat dans la région du BGL aient été réalisés.

Grands bassins (> 500 km²)

Les études portant sur de grands bassins hydrologiques (p. ex. rivière Grand, baie Saginaw et rivière Maumee) semblent indiquer une augmentation des réserves d'eau souterraine, mais elles montrent aussi que la sensibilité des eaux souterraines aux changements climatiques dépend fortement des caractéristiques physiographiques locales, et l'incertitude des simulations des modèles y est également soulignée.

Erler et al. (2019 b) ont élaboré le modèle HGS à une échelle sous kilométrique pour le bassin versant de la rivière Grand (6 800 km²) mentionné dans la section 3.1. Ils ont prédit que les niveaux d'eau souterraine pourrait baisser dans le scénario climatique plus sec et s'élever dans le scénario climatique plus humide, en particulier dans les régions où la nappe phréatique est plus profonde (c. à d. où elle se trouve à plus de 2 m sous la surface du sol; soit 15 % de la superficie). Niu et al. (2014) ont examiné les éléments du bilan hydrique et les changements dans les réserves d'eau souterraine dans les bassins de la rivière Grand et de la baie Saginaw entre 1995 et 2007, en combinant des données de télédétection (GRACE pour les changements dans les réserves d'eau du bassin versant et MODIS pour l'évapotranspiration) et le modèle PAWS, un modèle hydrologique fondé sur les processus. Leurs résultats indiquent que les réserves d'eau souterraine ont augmenté dans les deux bassins versants. Ce changement serait principalement attribuable aux eaux souterraines peu profondes, en particulier aux éléments de la zone vadose et de l'aquifère libre. Les eaux

de surface et les aquifères captifs ne contribuaient pas beaucoup à ces changements dans les réserves. Hachborn et al. (2017) ont examiné la sensibilité des estimations dérivées de GRACE des changements des niveaux d'eau souterraine dans le sud de l'Ontario.

Colautti (2010) a simulé le bassin de la rivière Grand (6 800 km²) à l'aide du modèle HGS et de cinq scénarios synthétiques pour le milieu du siècle élaborés à partir de modifications du relevé des précipitations de 1960 à 1999 (de -5 % à +20 %) et délimités par des scénarios climatiques fondés sur des MCG. Les résultats montrent une élévation du niveau de la nappe phréatique (variant entre 0,36 et 1,08 m) pour la plupart des scénarios futurs, sauf lorsqu'on laissait les précipitations diminuer de 5 %; il y avait, dans ce cas, une baisse du niveau de la nappe phréatique de 0,48 m. Kujawa et al. (2020) ont examiné l'incertitude des modèles existants pour le bassin versant de la rivière Maumee, soit le plus grand bassin hydrologique alimentant les Grands Lacs. Ils ont combiné cinq modèles SWAT indépendants avec six modèles climatiques tirés du CMIP5 (CanESM, CSIRO r6, CSIRO r4, CSIRO r10, MPI ESM et NorESM) pour examiner les projections historiques (de 1996 à 2015) et futures (de 2046 à 2065). Ils n'ont observé aucun changement clair dans la quantité d'eau souterraine et la qualité des eaux souterraines au milieu du siècle. Il convient toutefois de noter que la capacité de simulation des eaux souterraines des modèles SWAT est limitée.

Échelle continentale

Les projections de modèles à l'échelle continentale n'en sont qu'à leurs débuts et sont encore rares et incertaines au Canada, notamment en ce qui concerne leurs implications pour les Grands Lacs. Chen et al. (2020) ont réalisé l'une des premières études de modélisation hydrologique à grande échelle pour le Canada continental en utilisant un modèle HGS eaux souterraines-eaux de surface entièrement intégré. Ils ont utilisé le modèle pour effectuer une analyse régionale de l'écoulement d'eau souterraine dans l'ouest du Canada et une analyse du bilan hydrique dans les Grands Lacs. Le modèle a permis de bien rendre le drainage de surface dans la majeure partie du Canada, malgré la représentation hydrostratigraphique très simplifiée et la faible résolution du maillage. Sa performance se détériorait toutefois dans les régions de l'Arctique et des Grands Lacs. Les auteurs ont attribué ceci à l'incertitude des précipitations observées; ils ont recommandé d'améliorer la climatologie d'observation dans ces régions. Leur étude a mis en évidence d'importants réseaux d'écoulement souterrain à grande échelle, qui ont une incidence sur la disponibilité de l'eau douce au pays. Ces réseaux pourraient être touchés par les changements climatiques, ce qui aurait un impact sur la disponibilité des eaux souterraines.

7.3.3. Résurgence d'eau souterraine et interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface

Le drainage souterrain (drains souterrains) est une composante essentielle du système hydrologique, et il a une incidence sur l'émergence d'eau souterraine et la dynamique entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans les champs agricoles typiques du bassin

des Grands Lacs. Cependant, les études qui se sont penchées là-dessus sont limitées, et les résultats semblent varier considérablement. Pease et al. (2017) ont évalué les répercussions que les changements climatiques pourraient avoir à l'avenir sur l'hydrologie souterraine et le rendement du drainage contrôlé dans un site en champ dans les eaux d'amont du bassin ouest du lac Érié. L'émergence des eaux de drainage souterrain a été surveillée au site entre 2013 et 2015. Quatre-vingt trois projections climatiques ont été utilisées pour piloter un modèle hydrologique fondé sur les processus, à l'échelle du champ, DRAINMOD (Skaggs et al., 2012), afin de simuler le bilan hydrique des sols où le niveau de la nappe phréatique est élevé et qui sont drainés artificiellement. D'ici la fin du siècle, on prévoit que l'émergence des eaux de drainage souterrain diminuera (de 14,5 % à 23,7 %), la baisse la plus importante se produisant pendant l'automne en raison de l'augmentation de la température et de l'évapotranspiration. Les auteurs ont reconnu les différences par rapport à l'émergence d'eau souterraine prévue selon d'autres études et les ont attribuées à des conditions de gel du sol différentes et à de futurs projets liés au climat, qui seront réalisés entre l'Ohio et d'autres régions de plus hautes latitudes. Les résultats portent à croire que le rôle du drainage contrôlé – de potentiellement retenir une plus grande quantité d'eau disponible pour les cultures dans le profil du sol – pourrait revêtir une importance cruciale dans les conditions climatiques futures. Dans le cadre d'une étude réalisée par Mehan et al. (2019) dans le bassin versant de Matson Ditch, dans le nord-est de l'Indiana, on a utilisé les prévisions du CMIP5 (scénarios RCP 4.5 et 8.5) pour forcer un modèle SWAT (Arnold et al., 1998). Les résultats obtenus indiquent que les débits totaux annuels de drainage souterrain pourraient augmenter de 70 % d'ici la fin du 21^e siècle.

D'après Persaud et al. (2020), dans le bassin versant du cours supérieur du ruisseau Parkhill, une réduction importante de l'émergence d'eau souterraine au milieu du siècle est plus probable, mais il ne devrait y avoir aucune modification substantielle du niveau des eaux souterraines ou du flux d'échange net. Cochand et al. (2019) ont étudié les effets des changements climatiques sur les systèmes hydrologiques d'un bassin versant de la rivière Saint Charles au Québec, où les processus hivernaux jouent un rôle important. La moyenne des prévisions de multiples MCG et de trois scénarios d'émissions a été utilisée comme intrant climatique. Un modèle HGS a été modifié afin d'inclure les effets de l'accumulation et de la fonte de la neige. Les simulations donnent à penser que la dynamique de l'écoulement en surface et souterrain, en particulier en hiver, sera considérablement touchée par les changements climatiques. Les auteurs prévoient qu'il devrait y avoir une augmentation considérable des charges hydrauliques et des débits d'eau en hiver en raison de la température plus élevée d'ici la fin du siècle, accompagnée d'une augmentation des précipitations liquides et des eaux de fonte de la neige. Les charges hydrauliques et les débits d'eau en été devraient cependant diminuer, dans une moindre mesure, en raison d'une augmentation de l'évapotranspiration. Sulis et al. (2012) ont appliqué le modèle des eaux de surface-eaux souterraines CATHY (Camporese et al., 2010) au bassin versant Des Anglais de 690 km², également situé au Québec, au Canada. Les résultats révèlent une grande incertitude entourant les données climatiques, mais ils semblent indiquer que les changements dans le régime de journées pluvieuses ont une incidence importante sur les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines et sur les flux d'alimentation

des eaux souterraines, les périodes sèches plus longues ayant une incidence sur la variabilité spatiale de l'humidité du sol.

Borchardt (2019) a étudié la corrélation entre la variabilité climatique, les débits de base et les prélèvements d'eaux souterraines au Wisconsin entre 1984 et 2014. Un modèle simple, RORA (USGS, 2017), a été utilisé comme outil d'étude préliminaire pour évaluer les effets des puits à grande capacité sur les variations du débit de base. Il a permis de relever une forte corrélation entre les prélèvements d'eaux souterraines et les débits de base vers les eaux de surface. Dans certaines régions, on a constaté que, à mesure que le nombre de puits prélevant de l'eau dans l'aquifère captif diminue, la tendance à la baisse du débit de base (15 %) associée aux seules variables climatiques est atténuée ou inversée (+67 %). Cependant, dans les régions où le nombre de puits prélevant de l'eau dans un aquifère libre a augmenté, la tendance à la baisse du débit de base s'est intensifiée (18 % à 28 %).

7.3.4. Qualité des eaux souterraines

Les changements climatiques peuvent avoir une incidence sur la qualité des eaux souterraines par le biais de divers mécanismes liés aux modifications des processus hydrologiques, comme l'alimentation des eaux souterraines, les réserves d'eau souterraine, l'émergence d'eau souterraine (p. ex., Bondu et al., 2016), ainsi qu'aux variations de la température de l'eau (Burri et al., 2019; Riedel, 2019). L'évolution des pratiques humaines, comme l'augmentation du pompage, l'irrigation supplémentaire ou les changements de l'utilisation des terres (p. ex. différentes cultures; différents besoins de déglacage des routes), découlant des changements climatiques, peut également avoir une incidence sur la qualité des eaux souterraines (Li et Merchant, 2013; Paradis et al., 2016). Amanambu et al. (2020) présentent un bref examen des préoccupations mondiales en matière de qualité des eaux souterraines, liées aux changements climatiques. Dans le bassin des Grands Lacs, il y a peu d'études jusqu'à présent qui portent sur la contamination des eaux souterraines sous l'effet des changements climatiques. D'autres études à ce sujet doivent être effectuées dans cette région, et également à l'échelle du Canada (Larocque et al., 2019). Les travaux réalisés jusqu'à maintenant dans le bassin des Grands Lacs comprennent la modélisation intégrée (Saleem et al., 2020) et l'évaluation de la vulnérabilité et des risques (Milner et al., 2020; Persaud et Levison, 2021).

Modélisation intégrée

Pour le bassin versant de la rivière Lynn (155 km²) dans le bassin du lac Érié, Saleem et al. (2020) ont élaboré un modèle intégré représentant l'écoulement souterrain et le transport des contaminants (modèle HGS couplé au modèle de qualité de l'eau de la zone racinaire [RZWQM2]) afin de simuler le transport des éléments nutritifs (nitrates) vers les eaux souterraines sous les champs agricoles (cultures commerciales). En combinaison avec trois MCR pour le forçage climatique futur (période de référence : 1986 2005; période future : 2040 2059), trois rotations possibles de cultures futures (rotation maïs soja, culture continue de maïs, rotation maïs-soja-blé d'hiver-trèfle rouge) ont été simulées et

comparées aux pratiques actuelles de rotation maïs soja. Les concentrations de nitrates simulées devraient être plus faibles au cours de la période future. Le scénario de culture continue de maïs a produit des concentrations de nitrates plus élevées que la rotation maïs soja. Le scénario des pratiques exemplaires de gestion (PEG) (rotation maïs-soja-blé d'hiver-trèfle rouge) a produit des concentrations de nitrates dans les eaux souterraines beaucoup plus faibles. Par conséquent, il a été recommandé d'adopter des PEG, en particulier dans les milieux hydrogéologiques vulnérables, afin de réduire les effets négatifs potentiels des changements climatiques sur la qualité des eaux souterraines.

En dehors du bassin des Grands Lacs, l'impact des changements climatiques sur les concentrations de nitrates dans les eaux souterraines et les effets combinés des pratiques agricoles ont été simulés pour l'Île du Prince Édouard dans l'est du Canada (Paradis et al., 2016). L'alimentation des eaux souterraines a été simulée à l'aide d'un modèle d'infiltration HELP, qui a été forcé par un ensemble de scénarios climatiques. Le modèle prévoit une augmentation de 25 à 32 % des concentrations de nitrates dans les eaux souterraines, accentuée par une diminution de l'alimentation des eaux souterraines (2,1 à 12,4 %), d'ici le milieu du siècle par rapport à la période historique (1970-2001). Cette augmentation a été attribuée à une augmentation du lessivage des nitrates provenant des charges héritées du passé et à l'intensification de l'agriculture découlant des changements climatiques.

Évaluation de la vulnérabilité

Milner et al. (2020) ont mis au point un outil d'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques, basé sur Microsoft Excel, pour la qualité des sources d'eau potable, tant pour les eaux de surface que pour les eaux souterraines, en Ontario. Le but de l'outil est d'offrir aux municipalités et aux autorités et comités chargés de la protection des sources des directives fondées sur la science sur la façon d'effectuer une évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques pour déterminer la qualité des sources d'eau potable. En fin de compte, l'exposition aux changements climatiques (degré d'exposition d'une zone, d'un puits ou d'une prise d'eau de surface aux variations climatiques) est évaluée, et une cote est établie, intégrant les tendances historiques et futures en matière de changements climatiques. Divers scénarios de changements climatiques peuvent être choisis. Une étude pilote a été élaborée pour le Seaforth Well Supply System (système de puits d'approvisionnement en eau de Seaforth), qui comprend trois puits municipaux desservant 2 900 personnes. Le système est situé dans le sud-ouest de l'Ontario, dans le bassin du lac Huron (bassin versant de la vallée de la Maitland, 3 266 km²). Les résultats de l'outil d'évaluation indiquent que la zone présente une exposition modérée à élevée aux changements climatiques (pour les périodes saisonnières et annuelles), la moitié des caractéristiques au niveau de la zone évaluée (p. ex. géologie, utilisation des terres) et du puits (p. ex. profondeur de la nappe phréatique, problèmes historiques) étant très sensibles aux changements climatiques. L'impact global final pour la zone a été évalué comme étant « moyen » (5,7/9), ce qui donne à penser que la qualité de l'eau des sources d'approvisionnement pourrait être modérément touchée par les changements climatiques.

Persaud et Levison (2021) ont modifié une méthode d'indice de vulnérabilité (DRASTIC LU) pour mieux comprendre comment le risque de contamination des eaux souterraines peut changer d'ici le milieu du siècle (2050), tout en tenant compte de l'influence de la complexité du plan d'utilisation des terres. La méthode a été appliquée dans le sud-ouest de l'Ontario, dans le bassin versant du cours supérieur du ruisseau Parkhill (130 km²; bassin du lac Huron), au moyen d'une approche empirique pour obtenir des valeurs de forçage climatique pour le milieu du siècle (années 2050) (période de référence : 1979-2060; période future : 2045-2060). Plusieurs scénarios d'utilisation future des terres ont été élaborés à l'aide du modèle TerrSet (TerrSet Land Change Modeler; clarklabs.org/terrset/land-change-modeler), intégrant diverses rotations de cultures ainsi que le drainage souterrain. Pour la zone d'étude de cas, tous les scénarios de prévision présentaient une augmentation statistiquement significative des valeurs moyennes de l'indice DRASTIC LU par rapport à la période de référence (c. à d. un risque de contamination plus élevé prévu à l'avenir). Les principales recommandations sont les suivantes : 1) une représentation plus détaillée de l'utilisation des terres agricoles (y compris les données sur la rotation des cultures et le drainage souterrain) pourrait améliorer les prévisions du modèle; et 2) la représentation de l'utilisation des terres dans le modèle peut influencer sur les changements futurs prévus du risque de contamination des eaux souterraines. Persaud et Levison (2021) ont fourni un outil d'évaluation précieux pour comprendre les changements possibles du risque de contamination des eaux souterraines dans les régions rurales.

7.3.5. Aggravation des répercussions du développement urbain futur sur les eaux souterraines

Les études portant sur les répercussions du développement urbain sur la quantité d'eau souterraine et la qualité des eaux souterraines sont rares. Rougé et Cai (2014) ont utilisé une analyse statistique comparative, comprenant le test de tendance de Mann Kendall et le test du point de changement de Pettitt, pour examiner les répercussions hydrologiques à des échelles croisées de l'urbanisation et de la variabilité du climat dans la région du Grand Chicago. Ils ont utilisé des données hydrologiques du nord est de l'Illinois, qui comprenaient des données quotidiennes sur l'écoulement provenant de 29 stations de mesure de l'écoulement fluvial pour la période 1953-2007 et de 36 stations pour la période 1969-2007. Les résultats donnent à penser que l'expansion urbaine a augmenté la valeur de la plupart des mesures de l'écoulement fluvial (p. ex. les débits moyens et à différents centiles pour plusieurs saisons), à l'exception des débits printaniers et des débits de pointe particuliers. Les grands bassins (> 200 km²) ont connu des changements plus homogènes du débit des cours d'eau que les plus petits bassins (< 100 km²). La superficie des surfaces imperméables était liée à une augmentation des inondations, mais les installations de gestion des eaux pluviales et les mesures d'atténuation des inondations ont permis d'atténuer les répercussions à différentes échelles spatiales. Une augmentation de la demande d'eau a entraîné une extraction non durable d'eau souterraine dans le bassin du lac Michigan ainsi qu'une augmentation du débit de base, ce qui a eu pour effet d'atténuer la réduction de l'infiltration et du débit de base par les surfaces imperméables. Les auteurs ont souligné que l'analyse statistique des inférences anthropiques directes est difficile en raison de la variabilité climatique spatiotemporelle.

L'outil d'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques pour les sources d'eau potable, élaboré par Milner et al. (2020) (mentionné également à la section 3.4), fournit une méthode scientifique aux gestionnaires locaux des ressources en eau, qui combine des méthodes statistiques à un ensemble multimodèle, créé à partir de simulations de modèles existants provenant de plusieurs centres de modélisation climatique (scénarios RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5). Une étude pilote a appliqué l'outil : (1) aux prises d'eau potable de Burlington dans le lac Ontario, (2) au système de puits d'approvisionnement en eau souterraine de Seaforth; et (3) à la prise d'eau potable de la rivière Mattagami. Les données historiques (1970 2013, 1960 2008 et 1970 2013, respectivement) et les projections climatiques futures du scénario RCP 8.5 (2014 2050, 2020 2050 et 2014 2050, respectivement) ont été utilisées. Les résultats indiquent une exposition relativement élevée aux changements climatiques au cours des périodes saisonnières et annuelles pour toutes les études de cas, mais l'incertitude de l'évaluation de l'exposition est également considérée comme élevée, puisque des données modélisées sont utilisées

7.3.6. Écohydrologie (incluant la qualité des eaux de surface)

Très peu d'études ont porté sur l'écohydrologie liée aux réseaux d'eau souterraine et aux changements climatiques, en particulier dans le bassin des Grands Lacs. Kløve et al. (2014) présentent un examen complet des effets des changements climatiques sur les écosystèmes dépendant des eaux souterraines (EDES). L'écohydrologie peut être fortement influencée par le climat ainsi que par les changements d'utilisation des terres, car les afflux d'eau souterraine vers les récepteurs d'eaux de surface peuvent modifier les propriétés physicochimiques d'écosystèmes entiers (Hunt et al., 2016). Les EDES seront touchés par les changements prévus dans la disponibilité de l'eau, qui modifient le niveau des eaux souterraines, la quantité d'eau émergente et le moment de l'émergence (p. ex. débit printanier : Levison et al., 2014; débit des cours d'eau : Saha et al., 2017; dynamique des milieux humides : Levison et al., 2013; dégradation de la qualité de l'eau : Lipczynska Kochany, 2018; Conant et al., 2019; augmentations de température : Kurylyk et al., 2014; Riedel, 2019). Il s'agit d'un sujet qui nécessite beaucoup plus de recherches pour mieux comprendre de quelle façon les changements climatiques pourraient avoir une incidence sur les écosystèmes dépendant des eaux souterraines.

Dans le bassin versant de Matson Ditch (4 610 ha, nord-est de l'Indiana, bassin ouest du lac Érié), Mehan et al. (2019) ont examiné les effets des changements climatiques (deux RCP : 4.5 et 8.5) sur les charges en éléments nutritifs dans les zones agricoles drainées par un réseau souterrain à l'aide de modèles SWAT. Ils prévoient que, d'ici la fin du 21^e siècle, les débits de drainage souterrain pourraient augmenter de 70 % et le rendement en phosphore soluble pourrait diminuer de 30 à 60 %. Kujawa et al. (2020) ont utilisé six projections climatiques (2046 2065) et cinq modèles hydrologiques (SWAT) développés de façon indépendante pour examiner les charges en éléments nutritifs et l'hydrologie dans le bassin versant de la rivière Maumee. Ce bassin versant dominé par les cultures commerciales est situé dans le nord ouest de l'Ohio et dans certaines parties de l'Indiana et du Michigan. C'est un bassin versant considéré de façon prioritaire pour réduire l'occurrence des proliférations d'algues dans le bassin ouest du lac Érié. En ce qui concerne les scénarios simulés et les

divers modèles SWAT (qui ont une capacité de simulation limitée pour les eaux souterraines), il n'y avait pas de consensus clair sur l'orientation du changement quant à l'émergence d'eau souterraine ou aux charges en éléments nutritifs à l'avenir. Pour ce qui est des débits de drainage souterrain en particulier, la variation de l'émergence est passée d'une diminution de 18 % à une augmentation de 64 % (moyenne d'ensemble d'une augmentation de 18 %), ce qui était lié aux changements dans la production de ruissellement de surface. En ce qui concerne les charges futures prévues en éléments nutritifs, il n'y avait pas d'accord clair sur l'orientation du changement. Dans le sud de l'Ontario, Chu et al. (2008) ont étudié l'influence de la température de l'air et de l'émergence d'eau souterraine sur la diversité thermique des communautés de poissons d'eau courante dans 43 bassins versants quaternaires. Les scénarios de changements climatiques appliqués ont révélé que les bassins versants où l'émergence d'eau souterraine est plus élevée (c. à d. une plus grande diversité thermique des poissons) sont moins sensibles aux changements climatiques que ceux où l'émergence est plus faible. Surtout, ils ont fait ressortir que la conservation des ressources en eaux souterraines sera importante pour limiter les effets des changements climatiques sur l'habitat thermique et, par conséquent, sur la diversité thermique des poissons d'eau courante.

Comme il a été décrit précédemment, Milner et al. (2020) ont mis au point un outil d'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques, basé sur Microsoft Excel, pour la qualité des sources d'eau potable, tant pour les eaux de surface que pour les eaux souterraines, en Ontario. Cet outil pourrait être utilisé pour aider à comprendre la vulnérabilité de la qualité de l'eau attribuable aux changements climatiques pour diverses sources d'eau dans le cadre d'applications écohydrologiques. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une étude portant spécifiquement sur les changements climatiques, Carlson Mazur et al. (2014) ont élaboré une approche de fluctuation du niveau de l'eau pour estimer l'ET subquotidienne et les débits des eaux souterraines pour des milieux humides non riverains dynamiques et ont appliqué la méthode le long de la rive ouest du lac Huron, dans le parc d'État Negwegon, au Michigan. L'approche permet de mieux comprendre la demande en ET des plantes dans diverses conditions climatiques et hydrologiques.

Clairement, on devra accorder beaucoup plus d'importance aux effets des changements climatiques sur l'écohydrologie dans le BGL à l'avenir, au moyen d'une approche multidisciplinaire et de modèles pleinement intégrés qui représentent explicitement les processus associés aux eaux souterraines et les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Outre les programmes de surveillance habituels (c. à d. débits des rivières et niveau des eaux souterraines), la collecte de données écologiques, hydrologiques et géomorphologiques à petite échelle (à l'échelle de l'écosystème) est nécessaire pour bien comprendre les EDES et la façon dont ils peuvent être touchés par les changements climatiques et d'utilisation des terres (Kløve et al., 2014). La modélisation doit également être effectuée à une échelle suffisamment fine pour être significative et utile en ce qui concerne les processus écohydrologiques (p. ex., Girard et coll., 2015). Une compréhension approfondie sur le plan technique des problèmes potentiels est nécessaire pour aider à l'élaboration de règlements sur l'utilisation des terres afin de protéger les EDES dans le contexte des changements climatiques.

7.4 Méthodes, technologies et incertitudes

Diverses approches ont été utilisées pour examiner les effets des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans le BGL. Le tableau 7.1 résume les modèles et les méthodes de simulation ou d'analyse, issus d'approches fondées sur les bases de données, les indices et les statistiques, pour les modèles d'alimentation des eaux souterraines, les modèles des eaux souterraines et les modèles couplés des eaux de surface et des eaux souterraines entièrement intégrés. Le tableau 7.2 résume les scénarios et les données de forçage climatique.

La réduction des incertitudes associées à la modélisation climatique représente une difficulté majeure mise en évidence dans des études récentes. L'utilisation d'ensembles de modèles et de scénarios climatiques pour forcer les simulations hydrologiques a été recommandée. La nécessité d'améliorer la climatologie d'observation, la représentation des processus à la surface terrestre et de l'écoulement des eaux de surface et l'inclusion des processus périodiques et transitoires a également été soulignée. Il est maintenant reconnu que les données des MCG, ou les données de MCG ayant fait l'objet d'une réduction d'échelle statistique, ne fournissent pas un compte rendu complet de la façon dont les changements climatiques peuvent influencer sur l'hydroclimatologie dans le BGL, car les effets de lac, et en particulier la glace lacustre et les changements prévus de celle-ci, ne sont pas pris en compte. Les travaux de pointe actuels utilisent des projections climatiques ayant fait l'objet d'une réduction d'échelle dynamique, produites à l'aide de modèles climatiques régionaux, couplées à des modèles de glace lacustre (p. ex., Gula et Peltier, 2012; Notaro et al., 2012; Peltier et al., 2018).

Les différents modèles hydrologiques utilisés présentent des forces et des faiblesses liées à leur capacité à simuler les processus d'écoulement des eaux souterraines. Le niveau de détail du sous-sol influera sur l'intégrité de tout résultat axé sur les eaux souterraines et devrait être pris en compte lors de l'interprétation et de la comparaison des résultats de différentes études. La représentation de l'hétérogénéité spatiale associée à la modélisation hydrologique intégrée contribue également aux incertitudes. Certains auteurs ont également fait valoir que l'incertitude découle également de la sous-représentation du gel et du dégel saisonniers du sol (Cochand et al., 2019), ce qui a une incidence directe sur la dynamique de l'eau en hiver.

Les combinaisons variées de modèles, d'hypothèses, de modélisateurs et d'expériences peuvent créer de grandes incertitudes dans les évaluations, ce qui peut compliquer la comparaison d'une étude particulière dans une région donnée avec une autre dans une région différente utilisant une approche différente. Par conséquent, un certain niveau de normalisation des méthodes pourrait être nécessaire dans le BGL pour permettre d'évaluer l'influence relative des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine.

Tableau 7.1 Synthèse des modèles utilisés dans les études examinées et situées dans le BGL

Modèle (ou approche)	Description	Études utilisant ce modèle (ou cette approche)
DRAINMOD (Skaggs <i>et al.</i> , 2012)	Modèle distribué, fondé sur les processus, à l'échelle du champ, visant à décrire l'hydrologie des sols mal drainés ou drainés artificiellement. Utilisé pour déterminer l'alimentation des eaux souterraines.	Pease <i>et al.</i> (2017)
DRASTIC-LU (Alam <i>et al.</i> , 2014)	Méthode SIG qui intègre des données d'utilisation des terres et du sous-sol pour examiner la charge de polluants et la vulnérabilité des aquifères.	Persaud et Levison (2021)
HydroGeoSphere (Therrien <i>et al.</i> , 2010; Brunner et Simmons, 2012)	Modèle intégré d'écoulement (et de transport) des eaux souterraines/des eaux de surface	Chen <i>et al.</i> (2020) Colautti (2010) Erler <i>et al.</i> (2019b) Erler <i>et al.</i> (2019a) Persaud <i>et al.</i> (2020); Saleem <i>et al.</i> (2020)
HELP3 et VisualHELP (souvent utilisés avec les modèles des eaux souterraines) (Schroeder <i>et al.</i> , 1994)	Modélisation hydrologique pour la conception de sites d'enfouissement, la prévision de l'accumulation de lixiviat et des infiltrations de lixiviat dans la nappe phréatique. Utilisés pour déterminer l'alimentation des eaux souterraines.	Brouwers (2008)
MikeSHE/Mike 11 (DHI Software 2007)	Modèle intégré d'écoulement (et de transport) des eaux souterraines et des eaux de surface	Sultana et Coulibaly (2011)
MODFLOW Harbaugh (2005)	Modèle d'écoulement souterrain	Croley II et Luukkonen (2003)
Simulateur adaptatif de bassin versant fondé sur les processus (PAWS) (Shen et Phanikumar, 2010)	Résolution des lois de conservation fondées sur la physique pour les principaux processus du cycle hydrologique	Niu <i>et al.</i> (2014)
RORA (USGS, 2017)	Estimation de l'alimentation des eaux souterraines à partir de l'analyse des données sur les débits	Barlow <i>et al.</i> (2015)
RZWQM2 (modèle de qualité de l'eau de la zone racinaire) (Ma <i>et al.</i> , 2012) (couplé au modèle HydroGeoSphere)	Modèle de cultures pour la zone vadose 1D (utilisé pour le lessivage des nitrates vers les eaux souterraines)	Saleem <i>et al.</i> (2020); Borchardt (2019)
Outil d'évaluation des sols et de l'eau SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Arnold <i>et al.</i> (1998)	Modèle distribué des paramètres à l'échelle du bassin versant ou du bassin fluvial pour simuler l'écoulement de l'eau, le transport d'éléments nutritifs et le transport de sédiments (axé sur les processus de surface)	Kujawa <i>et al.</i> (2020); Mehan <i>et al.</i> (2019)
SWAT-MODFLOW (Kim <i>et al.</i> , 2008)	Hydrologie intégrée (SWAT pour les processus à la surface terrestre et	Larocque <i>et al.</i> (2019)

	MODFLOW pour l'écoulement des eaux souterraines spatialement explicite)	
Outil d'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques pour la qualité des sources d'eau potable (basé sur Microsoft Excel)	Combine des méthodes statistiques à un ensemble multimodèle créé à partir de simulations de modèles existants (pour les scénarios de forçage)	Milner <i>et al.</i> (2020)
Données de télédétection (p. ex. GRACE pour les changements dans les réserves d'eau du bassin versant et MODIS pour l'évapotranspiration)	GRACE : permet des mesures détaillées des anomalies du champ gravitationnel de la Terre; MODIS : offre une haute résolution radiométrique dans 36 bandes spectrales	Niu <i>et al.</i> (2014)
Détection des changements graduels et abrupts dans les données hydrologiques (à l'aide d'une approche statistique)	Combinaison des corrélations de rang de Mann-Kendall et de Pettitt. Un indicateur est extrait pour déterminer si un changement observé dans une série chronologique donnée est graduel ou abrupt.	Rougé et Cai (2014)

Tableau 7.2 Synthèse des modèles et des approches de forçage climatique utilisés dans les études examinées dans le BGL.

Modèle (ou approche)	Description
MCCG2	Deuxième génération du modèle couplé climatique global du Centre canadien de modélisation et d'analyse climatiques (CCmaC)
MCCG3.1	Troisième génération du modèle couplé climatique global du Centre canadien de modélisation et d'analyse climatiques (CCmaC)
CMIP5 (CanESM, CSIRO-r6, CSIRO-r4, CSIRO-r10, MPI-ESM et NorESM) et profil représentatif d'évolution de concentration (RCP)	Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP) (une base de données de simulations de modèles de circulation générale [MCG] couplés océan-atmosphère dans des conditions limites normalisées)
Approche empirique pour obtenir des valeurs pour le milieu du siècle (années 2050)	Prévision de l'alimentation nette future des eaux souterraines et du changement de la profondeur de la nappe phréatique, dans le cas d'endroits pour lesquels les données sont limitées
GCM-GFDL	Modèle climatique global du Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA)
GCM-GISS	Modèle climatique global du Goddard Institute for Space Studies (GISS) de la NASA
HadCM3 – Hadley Centre Coupled Model 3	Modèle couplé du Hadley Centre, version 3 (modèle de circulation générale)
Données observées et réanalyse des données de modèles	De multiples paramètres (précipitations, température, équivalent en eau de la neige [EEN] quotidien et rythme de fonte) utilisés pour classer les années récentes dans les catégories « chaude » ou « froide » afin d'examiner les différences dans les régimes de fonte nivale
RegCM 4	Modèle climatique régional, élaboré à l'origine au National Center for Atmospheric Research (NCAR), mis à jour par la section Earth System Physics (ESP) du Centre international de physique théorique (ICTP)

Scénarios synthétiques	Basés sur les prévisions du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC et les scénarios analogiques temporels fondés sur les conditions climatiques historiques
Modèles de recherche et de prévision météorologique (WRF)	Un système de prévision météorologique numérique pour les besoins en matière de recherche atmosphérique et de prévisions opérationnelles (National Centre for Atmospheric Research)

7.5 Besoins scientifiques

Le tableau 7.3 résume les besoins scientifiques mis en évidence dans les études examinées.

Tableau 7.3 Synthèse des besoins scientifiques mis en évidence dans les études examinées dans le BGL.

Besoins scientifiques	Besoins connexes et lacunes en matière d'information
Poursuivre la caractérisation des incertitudes associées aux projections climatiques et les réduire	<ul style="list-style-type: none"> • Besoin de reconnaître que les projections climatiques (c.-à-d. le forçage météorologique) de différents scénarios et modèles climatiques peuvent varier considérablement et sont parfois même contradictoires, ce qui produit des réactions hydrologiques et une dynamique des éléments nutritifs très variables. • La modélisation d'ensemble réduit les incertitudes relatives aux prévisions climatiques grâce au calcul de la moyenne pour plusieurs scénarios d'émissions et de représentations. • Des MCR ayant fait l'objet d'une réduction d'échelle dynamique permettent de bien rendre l'influence régionale (p. ex. les effets de lac) sur le bilan hydrique saisonnier. • La variabilité du climat dans le temps et dans l'espace demeure un problème pour l'analyse statistique des inférences anthropiques directes.
Poursuivre la caractérisation des incertitudes associées à la modélisation hydrologique et les réduire	<ul style="list-style-type: none"> • Besoin de reconnaître les effets des caractéristiques physiographiques locales sur la réponse des systèmes hydrologiques aux changements climatiques. • Besoin d'évaluer la sensibilité des différentes composantes hydrauliques ou les effets cumulatifs potentiels de multiples composantes hydrauliques sur la réaction aux changements climatiques. • Besoin d'améliorer la représentation des processus à la surface terrestre et de l'écoulement des eaux de surface, et d'inclure les processus périodiques et transitoires afin de quantifier les changements hydrologiques saisonniers et leurs répercussions potentielles tout au long de l'année hydraulique. • Des modèles entièrement intégrés qui représentent explicitement l'écoulement souterrain, le transport des contaminants et les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface sont nécessaires, et ils doivent être utilisés à une échelle suffisamment fine pour être pertinents pour les processus échohydrologiques. • Besoin d'explorer de nouvelles façons d'aborder les modèles de plus en plus complexes et exigeants sur le plan des calculs (y compris, par exemple, les processus couplés relatifs aux eaux souterraines, au transport de produits chimiques et à la température), car il faut souvent en arriver à un compromis entre la complexité et la représentativité des modèles.

Mieux comprendre l'impact combiné des changements climatiques, des changements d'utilisation des terres et du développement urbain sur les systèmes hydrologiques, et sur les options connexes de gestion, d'adaptation et d'atténuation.	<ul style="list-style-type: none"> • Besoin de reconnaître l'impact combiné des changements climatiques et du développement urbain sur la quantité d'eau souterraine et la qualité des eaux souterraines ainsi que la vulnérabilité des sources d'eau potable. • Plus de renseignements sur les facteurs de stress anthropiques et leurs projections futures, p. ex. détails sur le drainage souterrain dans les systèmes agricoles; quels types de cultures pourraient être cultivées dans la région dans 50 à 100 ans? • Mieux comprendre l'étendue spatiale et l'incidence de puits à grande capacité sur la quantité d'eau souterraine et la qualité des eaux souterraines, l'incidence étant accrue par les effets des changements climatiques.
Mieux caractériser les systèmes hydrauliques et améliorer les données d'observation (plus de données, surveillance à long terme).	<ul style="list-style-type: none"> • Assurer une surveillance à long terme de toutes les composantes hydrologiques et des températures du sol afin de mieux comprendre les bassins versants soumis à des facteurs de stress et la manière dont ils pourraient être touchés par les changements climatiques, notamment en raison de la fonte des neiges et des effets du gel et du dégel du sol. • Plus de données géologiques, meilleure caractérisation hydrogéologique dans la région. • Données écologiques, hydrologiques et géomorphologiques à petite échelle pour mieux comprendre les impacts écohydrologiques.
Mieux comprendre les effets des changements climatiques sur la qualité de l'eau (sur le terrain et à l'aide de la modélisation).	<ul style="list-style-type: none"> • Il faut mettre l'accent sur l'examen de différents types de contaminants (p. ex. de source ponctuelle et de source diffuse, d'origine humaine et d'origine géogénique).
Élaborer des modèles pratiques pour appuyer la mise en œuvre et l'adaptation aux changements climatiques.	<ul style="list-style-type: none"> • Les techniques de modélisation actuelles prennent beaucoup de temps et nécessitent de grandes quantités de données. Des outils conviviaux seraient utiles pour la mise en œuvre par les administrations locales à des fins d'adaptation aux changements climatiques.

Références:

- Alam, F., Umar, R., Ahmed, S., and Dar, F. A. (2014). A new model (DRASTIC-LU) for evaluating groundwater vulnerability in parts of central Ganga Plain, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(3):927–937.
- Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., Oyebamiji, A., and Ochege, F. U. (2020). Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, 589:125163.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modelling and assessment. Part I: Model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1):73–89.
- Barlow, P. M., Cunningham, W. L., Zhai, T., and Gray, M. (2015). US Geological Survey groundwater toolbox, a graphical and mapping interface for analysis of hydrologic data (version 1.0): user guide for estimation of base flow, runoff, and groundwater recharge from streamflow data. US Department of the Interior, US Geological Survey.

- Bondu, R., Cloutier, V., Rosa, E., and Benzaazoua, M. (2016). A Review and Evaluation of the Impacts of Climate Change on Geogenic Arsenic in Groundwater from Fractured Bedrock Aquifers. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(9):296.
- Borchardt, S. (2019). Are high-capacity wells mitigating or intensifying climate change effects on stream baseflow in the state of Wisconsin (USA)? A case study 1984–2014. *Environmental Earth Sciences*, 78(18):566.
- Brouwers, M. H. (2008). A Case Study for Assessing the Hydrologic Impacts of Climate Change at the Watershed Scale. MSc Thesis. University of Waterloo.
- Brunner, P. and Simmons, C. T. (2012). HydroGeoSphere: A Fully Integrated, Physically Based Hydrological Model. *Groundwater*, 50(2):170–176.
- Burri, N. M., Weatherl, R., Moeck, C., and Schirmer, M. (2019). A review of threats to groundwater quality in the anthropocene. *Science of The Total Environment*, 684:136–154.
- Camporese, M., Paniconi, C., Putti, M., and Orlandini, S. (2010). Surface-subsurface flow modeling with path-based runoff routing, boundary condition-based coupling, and assimilation of multisource observation data. *Water Resources Research*, 46(2).
- Carlson Mazur, M. L., Wiley, M. J., and Wilcox, D. A. (2014). Estimating evapotranspiration and groundwater flow from water-table fluctuations for a general wetland scenario. *Ecohydrology*, 7(2):378–390.
- Chen, J., Sudicky, E. A., Davison, J. H., Frey, S. K., Park, Y.-J., Hwang, H.-T., Erler, A. R., Berg, S. J., Callaghan, M. V., Miller, K., Ross, M., and Peltier, W. R. (2020). Towards a climate-driven simulation of coupled surface-subsurface hydrology at the continental scale: a Canadian example. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 45(1):11–27.
- Chu, C., Jones, N. E., Mandrak, N. E., Piggott, A. R., and Minns, C. K. (2008). The influence of air temperature, groundwater discharge, and climate change on the thermal diversity of stream fishes in southern Ontario watersheds. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 65(2):297–308.
- Cochand, F., Therrien, R., and Lemieux, J.-M. (2019). Integrated Hydrological Modeling of Climate Change Impacts in a Snow-Influenced Catchment. *Groundwater*, 57(1):3–20.
- Colautti, D. (2010). Modelling the Effects of Climate Change on the Surface and Subsurface Hydrology of the Grand River Watershed. PhD thesis.
- Conant, B., Robinson, C. E., Hinton, M. J., and Russell, H. A. J. (2019). A framework for conceptualizing groundwater-surface water interactions and identifying potential impacts on water quality, water quantity, and ecosystems. *Journal of Hydrology*, 574:609–627.

- Croley II, T. E. and Luukkonen, C. L. (2003). Potential effects of climate change on ground water in Lansing, Michigan. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(1):149–163.
- Erler, A. R., Frey, S. K., Khader, O., D’Orgeville, M., Park, Y.-J., Hwang, H.-T., Lapen, D. R., Peltier, W. R., and Sudicky, E. A. (2019a). Evaluating Climate Change Impacts on Soil Moisture and Groundwater Resources Within a Lake-Affected Region. *Water Resources Research*, 55(10):8142–8163.
- Erler, A. R., Frey, S. K., Khader, O., D’Orgeville, M., Park, Y.-J., Hwang, H.-T., Lapen, D. R., Richard Peltier, W., and Sudicky, E. A. (2019b). Simulating Climate Change Impacts on Surface Water Resources Within a Lake-Affected Region Using Regional Climate Projections. *Water Resources Research*, 55(1):130–155.
- Feinstein, D. T., Hunt, R. J., and Reeves, H. W. (2010). Regional groundwater-flow model of the Lake Michigan Basin in support of Great Lakes Basin water availability and use studies. Technical report.
- Ford, C. M., Kendall, A. D., and Hyndman, D. W. (2020). Effects of shifting snowmelt regimes on the hydrology of non-alpine temperate landscapes. *Journal of Hydrology*, 590:125517.
- Girard, P., Levison, J., Parrott, L., Larocque, M., Ouellet, M.-A., and Green, D. (2015). Modeling cross-scale relationships between climate, hydrology, and individual animals: generating scenarios for stream salamanders .
- Gula, J. and Peltier, W. R. (2012). Dynamical downscaling over the Great Lakes basin of North America using the WRF regional climate model: The impact of the Great Lakes system on regional greenhouse warming. *Journal of Climate*, 25(21):7723–7742.
- Hachborn, E., Berg, A., Levison, J., and Ambadan, J. T. (2017). Sensitivity of GRACE-derived estimates of groundwater-level changes in southern Ontario, Canada. *Hydrogeology Journal*, 25(8):2391–2402.
- Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA.
- Hunt, R. J., Hayashi, M., and Batelaan, O. (2016). Ecohydrology and Its Relation to Integrated Groundwater Management BT - Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges. pages 297–312. Springer International Publishing, Cham.
- Jyrkama, M. I. and Sykes, J. F. (2007). The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario). *Journal of Hydrology*, 338(3):237–250.
- Kim, N.W., Chung, I. M., Won, Y. S., and Arnold, J. G. (2008). Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. *Journal of Hydrology*, 356(1):1–16.

- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Uvo, C. B., Velasco, E., and Pulido-Velazquez, M. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518:250–266.
- Kujawa, H., Kalcic, M., Martin, J., Aloysius, N., Apostel, A., Kast, J., Murumkar, A., Evenson, G., Becker, R., Boles, C., Confesor, R., Dagnew, A., Guo, T., Logsdon Muenich, R., Redder, T., Scavia, D., and Wang, Y.-C. (2020). The hydrologic model as a source of nutrient loading uncertainty in a future climate. *Science of The Total Environment*, 724:138004.
- Kurylyk, B. L., MacQuarrie, K. T. B., and Voss, C. I. (2014). Climate change impacts on the temperature and magnitude of groundwater discharge from shallow, unconfined aquifers. *Water Resources Research*, 50(4):3253–3274.
- Larocque, M., Levison, J., Gagné, S., and Saleem, S. (2019). Groundwater use for agricultural production - current water budget and expected trends under climate change. Final report submitted to MAPAQ and OMAFRA. Montréal; Guelph. Technical report.
- Lawrence, D. M., Fisher, R. A., Koven, C. D., Oleson, K. W., Swenson, S. C., Bonan, G., Collier, N., Ghimire, B., van Kampenhout, L., Kennedy, D., Kluzek, E., Lawrence, P. J., Li, F., Li, H., Lombardozzi, D., Riley, W. J., Sacks, W. J., Shi, M., Vertenstein, M., Wieder, W. R., Xu, C., Ali, A. A., Badger, A. M., Bisht, G., van den Broeke, M., Brunke, M. A., Burns, S. P., Buzan, J., Clark, M., Craig, A., Dahlin, K., Drewniak, B., Fisher, J. B., Flanner, M., Fox, A. M., Gentine, P., Hoffman, F., Keppel-Aleks, G., Knox, R., Kumar, S., Lenaerts, J., Leung, L. R., Lipscomb, W. H., Lu, Y., Pandey, A., Pelletier, J. D., Perket, J., Randerson, J. T., Ricciuto, D. M., Sanderson, B. M., Slater, A., Subin, Z. M., Tang, J., Thomas, R. Q., Val Martin, M., and Zeng, X. (2019). The Community Land Model Version 5: Description of New Features, Benchmarking, and Impact of Forcing Uncertainty. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(12):4245–4287.
- Levison, J., Larocque, M., Fournier, V., Gagné, S., Pellerin, S., and Ouellet, M. A. (2013). Dynamics of a headwater system and peatland under current conditions and with climate change. *Hydrological Processes*, 28(17):4808–4822.
- Levison, J., Larocque, M., and Ouellet, M. A. (2014). Modeling low-flow bedrock springs providing ecological habitats with climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 515:16–28.
- Li, R. and Merchant, J.W. (2013). Modeling vulnerability of groundwater to pollution under future scenarios of climate change and biofuels-related land use change: A case study in North Dakota, USA. *Science of The Total Environment*, 447:32–45.
- Lipczynska-Kochany, E. (2018). Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: A review. *Science of The Total Environment*, 640-641:1548–1565.

- Ma, L., R. Ahuja, L., T. Nolan, B., W. Malone, R., J. Trout, T., and Qi, Z. (2012). Root Zone Water Quality Model (RZWQM2): Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4):1425–1446.
- Mehan, S., Aggarwal, R., Gitau, M. W., Flanagan, D. C., Wallace, C. W., and Frankenberger, J. R. (2019). Assessment of hydrology and nutrient losses in a changing climate in a subsurface-drained watershed. *Science of The Total Environment*, 688:1236–1251.
- Milner, G., Delaney, F., Lam, S., Jacob, G., Bloomfield, D., and Gowda, C. (2020). Climate Change Vulnerability Assessment Tool for Drinking Water Source Quality. Technical report.
- Motiee, H. and McBean, E. (2017). Assessment of Climate Change Impacts on Groundwater Recharge for Different Soil Types-Guelph Region in Grand River Basin, Canada TT -. *ECOPERSIA*, 5(2):1731–1744.
- Niu, J., Shen, C., Li, S.-G., and Phanikumar, M. S. (2014). Quantifying storage changes in regional Great Lakes watersheds using a coupled subsurface-land surface process model and GRACE, MODIS products. *Water Resources Research*, 50(9):7359–7377.
- Notaro, M., Holman, K., Zarrin, A., Fluck, E., Vavrus, S. J., and Bennington, V. (2012). Influence of the Laurentian Great Lakes on Regional Climate. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, volume 2012, pages H54E–02.
- Paradis, D., Vigneault, H., Lefebvre, R., Savard, M. M., Ballard, J.-M., and Qian, B. (2016). Groundwater nitrate concentration evolution under climate change and agricultural adaptation scenarios: Prince Edward Island, Canada. *Earth Syst. Dynam.*, 7(1):183–202.
- Pease, L. A., Fausey, N. R., Martin, J. F., and Brown, L. C. (2017). Projected climate change effects on subsurface drainage and the performance of controlled drainage in the Western Lake Erie Basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(3):240 LP – 250.
- Peltier, W. R., D’Orgeville, M., Erler, A. R., and Xie, F. (2018). Uncertainty in future summer precipitation in the Laurentian Great Lakes Basin: Dynamical downscaling and the influence of continental-scale processes on regional climate change. *Journal of Climate*, 31(7):2651–2673.
- Persaud, E. and Levison, J. (2021). Impacts of changing watershed conditions in the assessment of future groundwater contamination risk. *Journal of Hydrology*.
- Persaud, E., Levison, J., MacRitchie, S., Berg, S. J., Erler, A. R., Parker, B., and Sudicky, E. (2020). Integrated modelling to assess climate change impacts on groundwater and surface water in the Great Lakes Basin using diverse climate forcing. *Journal of Hydrology*, 584:124682.
- Riedel, T. (2019). Temperature-associated changes in groundwater quality. *Journal of Hydrology*, 572:206–212.

- Rougé, C. and Cai, X. (2014). Crossing-scale hydrological impacts of urbanization and climate variability in the Greater Chicago Area. *Journal of Hydrology*, 517:13–27.
- Saha, G. C., Li, J., Thring, R. W., Hirshfield, F., and Paul, S. S. (2017). Temporal dynamics of groundwater-surface water interaction under the effects of climate change: A case study in the Kiskatinaw River Watershed, Canada. *Journal of Hydrology*, 551:440–452.
- Saleem, S., Levison, J., Parker, B., Martin, R., and Persaud, E. (2020). Impacts of Climate Change and Different Crop Rotation Scenarios on Groundwater Nitrate Concentrations in a Sandy Aquifer.
- Schroeder, P. R., Dozier, T. S., Zappi, P. A., McEnroe, B. M., Sjostrom, J. W., and Peyton, R. L. (1994). The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Engineering documentation for version 3.
- Shen, C. and Phanikumar, M. S. (2010). A process-based, distributed hydrologic model based on a large-scale method for surface–subsurface coupling. *Advances in Water Resources*, 33(12):1524–1541.
- Skaggs, R. W., Youssef, M. A., and Chescheir, G. M. (2012). DRAINMOD: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4):1509–1522.
- Sulis, M., Paniconi, C., Marrocu, M., Huard, D., and Chaumont, D. (2012). Hydrologic response to multimodel climate output using a physically based model of groundwater/surface water interactions. *Water Resources Research*, 48(12).
- Sultana, Z. and Coulibaly, P. (2011). Distributed modelling of future changes in hydrological processes of Spencer Creek watershed. *Hydrological Processes*, 25(8):1254–1270.
- Therrien, R., McLaren, R., Sudicky, E., and S.M., Panday. (2010). A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. User Guide. Waterloo, Ontario. Technical report, Waterloo.

8 CONCLUSIONS

Elis Damasceno Silva¹, Mohamed Mohamed¹, Howard W. Reeves²

¹ *Environnement et Changement climatique Canada, Burlington, Ontario, Canada*

² *U.S. Geological Survey, Lansing, Michigan, USA*

8.1 Introduction

Dans l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs, à l'annexe 8, le Canada et les États Unis s'engagent à publier un rapport initial sur les données scientifiques pertinentes et disponibles relatives aux eaux souterraines et à mettre à jour ce rapport au moins une fois tous les six ans, dans le but de mettre en évidence les progrès importants et pertinents, les nouveaux enjeux ou les contraintes concernant l'impact des eaux souterraines sur la qualité de l'environnement dans le bassin des Grands Lacs. Le rapport initial intitulé Science des eaux souterraines applicable à l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs : rapport de situation (rapport de 2016) constitue un examen exhaustif à cet égard. Le rapport est divisé en six sujets et détermine les besoins scientifiques liés à chacun de ces sujets. Ce premier rapport sert donc de toile de fond et de contexte pour les décideurs de tous les ordres de gouvernement dans le bassin des Grands Lacs, ainsi que pour les gestionnaires de bassins versants et les scientifiques en général. Le présent rapport constitue une mise à jour du rapport de 2016; il décrit les progrès réalisés et les lacunes à combler sur le plan des connaissances et détermine les enjeux émergents ou jusqu'alors inconnus. Cette mise à jour n'a pas pour but de fournir des détails exhaustifs sur les progrès scientifiques graduels, qui dépassent la portée de ce travail. Les mises à jour concernant les progrès réalisés pour répondre aux besoins scientifiques et combler les principales lacunes, les sources de préoccupation récurrentes et les contraintes sont décrites ci-dessous.

Les conclusions générales du rapport Science des eaux souterraines applicable à l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs : rapport sur la situation (rapport de 2016) sont notamment les suivantes : les eaux souterraines peuvent constituer une zone de traitement ou de stockage contribuant à protéger, voire même à améliorer, la qualité de l'eau des Grands Lacs et la santé des écosystèmes aquatiques; en même temps, le système aquifère peut constituer une source de contaminants à long terme, qui menacent la qualité de l'eau et les organismes aquatiques dans les eaux de surface réceptrices; et, finalement, il existe d'importantes lacunes dans notre compréhension de l'impact des eaux souterraines sur la disponibilité de l'habitat dans le bassin des Grands Lacs, ce qui influe sur la capacité à gérer efficacement cette ressource.

8.2 Mises à jour et progrès concernant les lacunes et besoins en matière de données scientifiques mentionnés dans le rapport de 2016

Les principales lacunes en matière de données et les besoins scientifiques à combler pour pouvoir améliorer la compréhension des enjeux relatifs aux eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs sont déterminés dans le rapport de 2016. Les lacunes et les besoins scientifiques (en italique) ainsi que les progrès réalisés depuis le rapport précédent concernant ces enjeux sont indiqués ci dessous.

Évaluation approfondie de l'émergence de l'eau souterraine à l'échelle régionale vers l'eau de surface dans le bassin des Grands Lacs

L'évaluation de l'émergence d'eaux souterraines à l'échelle régionale dans les eaux de surface du bassin des Grands Lacs nécessite la surveillance des conditions hydrologiques et la modélisation du bilan hydrique. Les travaux récents de développement d'un modèle couplé d'eaux souterraines/de surface pour le bassin donnent un aperçu de la dynamique relative du système couplé et des échanges saisonniers moyens à long terme d'eau entre les systèmes d'eaux souterraines et d'eaux de surface (chapitre 2). Diverses approches basées sur la modélisation et les traceurs sont en cours d'élaboration afin d'obtenir des estimations des charges de contaminants rejetées dans les eaux réceptrices, à partir de sources de contaminants ponctuelles et diffuses. La quantification des charges de contaminants à l'échelle régionale est un atout pour l'évaluation des effets (chapitre 3); toutefois, des méthodes à jour seraient utiles, car elles compléteraient les données sur les sources de contaminants grâce à une modélisation hydrologique plus détaillée. Des progrès ont été réalisés en ce qui concerne les éléments nutritifs par l'intégration des bases de données sur ceux ci et des données SIG, afin de disposer de modèles à plus grande échelle (chapitre 4). En outre, des progrès récents ont été réalisés en ce qui concerne la compréhension des mesures de contrôle du paysage sur les flux d'éléments nutritifs vers les eaux souterraines (chapitre 4). Un modèle intégré d'eaux souterraines/de surface pour le bassin des Grands Lacs a été publié récemment et peut servir de banc d'essai pour montrer comment de tels modèles régionaux peuvent aider à répondre aux questions sur le rôle des eaux souterraines dans le système (chapitre 2).

L'évaluation de l'émergence d'eaux souterraines à l'échelle régionale dans les eaux de surface est également nécessaire pour évaluer les répercussions potentielles des changements climatiques sur les eaux souterraines. Les changements climatiques peuvent avoir une incidence sur le moment et l'ampleur des épisodes de précipitations, la température de l'air et la température des précipitations. La rapidité avec laquelle ces changements toucheront certaines parties du bassin des Grands Lacs peut dépendre de la manière dont ces changements interagissent avec le système d'eaux souterraines. Une meilleure connaissance de la dynamique des eaux souterraines dans le système régional peut aider à réduire les incertitudes liées à la modélisation climatique. La dynamique du système couplé d'eaux souterraines/de surface est principalement abordée au moyen

d'ensembles de modèles et de scénarios climatiques pour forcer les simulations hydrologiques (chapitre 7).

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

Selon le rapport de 2016, la quantification des sources de contaminants dans les eaux souterraines est un besoin scientifique. À ce jour, la recherche a principalement porté sur les éléments nutritifs d'origine agricole, les hydrocarbures pétroliers et les sels de voirie, et peu de travaux ont été consacrés à d'autres contaminants, y compris ceux qui sont considérés comme des contaminants nouvellement préoccupants. La connaissance des sources de nouveaux contaminants connus sous le nom de substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (PFAS), dont la persistance et la toxicité potentielle à de faibles concentrations en font une menace pour la qualité de l'eau des Grands Lacs, a connu quelques avancées (chapitre 3). La compréhension de la contamination des eaux souterraines dans les milieux urbains constitue un défi en raison de la densité élevée de sources ponctuelles et diffuses, modernes et historiques, de contaminants des eaux souterraines, ces sources étant souvent inconnues (chapitre 6). Il est difficile d'établir un lien entre les contaminants détectés dans l'environnement et leur source, car de nombreuses substances chimiques proviennent de sources multiples et parcourent également de longues distances, ce qui complique particulièrement les choses en contexte urbain (chapitre 6). Plusieurs techniques sont en cours d'élaboration pour aider à déterminer et à quantifier ces contaminants et leurs sources, notamment une approche d'analyse préliminaire, des indicateurs basés sur les éléments traces inorganiques, les ions majeurs ou les isotopes stables, et des techniques d'analyse en grappes pour distinguer les concentrations naturelles de fond de celles dans les zones de sources anthropiques. De nouveaux contaminants préoccupants, tels que les édulcorants artificiels, ont également été utilisés comme traceurs/indicateurs (chapitre 3). Des lignes directrices ont été élaborées pour mesurer la contamination des eaux souterraines, et un facteur d'importance de la réaction a été créé pour prédire l'efficacité de l'élimination des éléments nutritifs dans les zones hyporhéiques (chapitre 3).

Suivi et surveillance continue de la qualité des eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs

Le rapport de 2016 a mis en évidence un manque de programmes de collecte de données et de surveillance. Ce manque de données nuit à la prise de décision par les gouvernements et les décideurs et à la capacité des spécialistes et des modélisateurs des eaux souterraines d'évaluer et de simuler avec exactitude les changements dans les eaux souterraines. Pour que les modèles et les simulations soient efficaces, les données de surveillance doivent être suffisamment détaillées dans le temps et dans l'espace pour permettre de réduire l'incertitude des modèles. Des données de surveillance robustes provenant de plusieurs endroits sont également nécessaires pour faire passer les modèles et les prévisions de l'échelle locale à l'échelle régionale. Des administrations autres que

celles responsables du bassin des Grands Lacs déploient des efforts d'ordre législatif pour accroître la collecte, la coordination et l'utilisation des données sur les eaux souterraines afin d'appuyer la prise de décision. Une loi semblable visant le bassin des Grands Lacs permettrait de progresser en vue d'atteindre l'objectif de disposer de données sur les eaux souterraines à la fois accessibles et coordonnées. Les spécialistes estiment que la création d'une base de données ouverte et robuste est un outil important pour l'élaboration de cadres géologiques, de régimes hydrogéologiques et de modèles d'eaux souterraines et, ultimement, pour une prise de décision améliorée.

Recherche approfondie sur l'analyse locale de l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface

Les eaux souterraines transportant des contaminants ou des éléments nutritifs et émergeant dans les cours d'eau et les lacs ont fait l'objet de plusieurs études de terrain dans l'ensemble du bassin des Grands Lacs. Ces études ont permis de mieux comprendre comment l'émergence et les cycles dans la zone hyporhéique peuvent influencer sur les cycles biogéochimiques et l'atténuation des contaminants. Plusieurs études ont mesuré l'émergence d'éléments nutritifs, de phosphore et de nitrates dans les eaux de surface, afin d'évaluer l'importance du transport par les eaux souterraines en ce qui concerne la charge chronique d'éléments nutritifs dans les eaux de surface (chapitre 4). La recherche effectuée comprend également l'élaboration de méthodes visant à améliorer les stratégies d'échantillonnage et à soutenir la mise à plus grande échelle des mesures enregistrées localement afin de permettre une compréhension régionale (chapitre 2).

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

Mesurer les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface est un défi, et de nouvelles méthodes sont nécessaires pour augmenter et améliorer la surveillance et le suivi. Les avancées dans les technologies de capteurs et leur plus grande abordabilité permettront d'améliorer la surveillance des eaux souterraines. La meilleure façon d'utiliser les données de ces nouveaux capteurs serait d'intégrer ces derniers aux technologies d'information et de communication, afin d'améliorer l'efficacité de la gestion des données de terrain en vue de faciliter la prise de décision en temps opportun. Des progrès mineurs ont été réalisés dans l'élaboration de méthodes d'évaluation des impacts de la contamination sur les eaux souterraines, notamment la mise au point d'une sonde de vitesse posée sur le lit du cours d'eau, qui peut aider à mesurer le débit dans les zones d'émergence de contaminants, ainsi que l'utilisation de nouveaux traceurs tels que les édulcorants artificiels pour mesurer leur déplacement des eaux souterraines vers les eaux de surface (chapitre 3). En ce qui concerne l'évaluation des éléments nutritifs, une nouvelle méthode a été mise au point pour estimer l'ampleur du flux d'azote vers les eaux de surface et le moment où il se produit (chapitre 4). Pour l'évaluation des écosystèmes dépendant des eaux souterraines (chapitre 5), des techniques de télédétection ont été mises au point pour cartographier et classer les milieux humides côtiers de l'ensemble du bassin des Grands Lacs. Dans la partie américaine du bassin, un indice de stress cumulatif est en cours d'élaboration; il intègre de multiples facteurs de stress anthropiques et des méthodes et

des indicateurs normalisés (p. ex. les poissons) pour évaluer l'état des milieux humides côtiers dans l'ensemble du bassin, avec des modifications qui pourraient être utiles pour évaluer l'état des écosystèmes dépendant des eaux souterraines (chapitre 5). De nouvelles méthodes de mesure et de modélisation ont été élaborées pour établir le lien entre les défaillances des égouts sanitaires et les fuites et déterminer la probabilité d'exfiltration des égouts (chapitre 6).

Recherche approfondie sur le rôle des eaux souterraines dans les habitats aquatiques du bassin des Grands Lacs

L'un des principaux besoins scientifiques cernés en vue de mieux comprendre l'impact des changements naturels et anthropiques sur les écosystèmes dépendant des eaux souterraines est le développement et l'application de modèles d'eaux souterraines qui peuvent simuler la recharge, le débit et l'émergence vers les eaux de surface (chapitre 5). Bien que de tels modèles intégrés existent, leur application pour comprendre les habitats aquatiques est limitée à ce jour. Des progrès ont été réalisés dans l'élaboration d'inventaires des milieux humides côtiers des Grands Lacs. La notion de l'effet des eaux souterraines sur la température des cours d'eau et donc sur le caractère convenable de l'habitat a été améliorée grâce à la création d'un système de classification en fonction de la taille et de la température des cours d'eau pour le bassin versant américain, qui pourrait potentiellement s'appliquer au bassin versant des Grands Lacs, voire à l'ensemble du bassin des Grands Lacs (chapitre 5). Des propositions ont également été faites pour développer un système de cartographie et de classification des écosystèmes fluviaux, qui inclut la classification des régimes thermiques liés à l'indice du débit de base. Des progrès ont été réalisés en matière de prévision des impacts sur les écosystèmes dépendant des eaux souterraines et d'évaluation de la vulnérabilité à l'aide de modèles d'eaux souterraines/de surface intégrés à d'autres outils écosystémiques. De plus, un cadre conceptuel pour évaluer les réactions écologiques associées aux facteurs de stress qui ont une incidence sur les eaux souterraines a été élaboré. Une étude récente sur la zone hyporhéique démontre que cette zone de transition peut être distinguée de la zone benthique en tant que communauté écologique distincte dont les limites varient en fonction des conditions hydrologiques (chapitre 5).

Amélioration de la compréhension des effets de l'expansion urbaine sur les eaux souterraines

Le besoin de mieux comprendre les eaux souterraines urbaines, en particulier en ce qui concerne les systèmes d'infiltration des eaux pluviales et les projets d'infrastructure souterraine (chapitre 6), se fait de plus en plus sentir. Des recherches récentes montrent que les cours d'eau urbains subissent l'influence des aménagements souterrains, qui créent de vastes canaux perméables susceptibles d'améliorer ou de ralentir l'écoulement latéral à faible profondeur des eaux souterraines en fonction d'autres facteurs (chapitre 6). Ces activités humaines dans l'environnement souterrain naturel, déjà complexe, ajoutent encore à la complexité, et bien que certains aspects s'appliquent de façon générale, des études supplémentaires sont nécessaires pour comprendre pleinement comment les sites/conditions spécifiques sont touchés.

La relation entre les eaux souterraines urbaines et les égouts est un sujet de préoccupation, car une grande partie de l'infrastructure du réseau d'égouts du bassin dans les zones urbaines est ancienne et présente des fuites. La hauteur de ces infrastructures par rapport à la nappe phréatique saturée détermine les zones d'infiltration potentielle (eaux souterraines pénétrant dans les égouts) et d'exfiltration (contamination des eaux souterraines par les eaux usées d'égout). Des études récentes au moyen de traceurs et d'autres méthodes ont permis d'observer régulièrement d'importants taux d'infiltration d'eaux souterraines dans les égouts. En modélisant l'exfiltration, les chercheurs ont constaté qu'il était nécessaire de mieux comprendre le processus d'exfiltration à l'échelle des canalisations et le transport d'eaux usées provenant de fuites des égouts (chapitre 6). Ces connaissances permettraient de faire avancer la modélisation du devenir des contaminants (chapitre 3) et de relever les défis liés à l'adaptation des modèles de l'échelle locale des canalisations à l'échelle des villes ou du réseau (chapitre 6). De nouvelles méthodes de mesure et de modélisation ont été mises au point pour établir le lien entre les défaillances des égouts sanitaires et les fuites et pour déterminer la probabilité d'exfiltration des égouts. Des études récentes se sont penchées directement sur la relation entre les eaux pluviales et les eaux souterraines, ce qui a permis de mieux comprendre les différentes concentrations de contaminants (virus, agents pathogènes, produits pharmaceutiques et produits de soins personnels) présents dans les réseaux d'eaux pluviales (chapitre 6).

Les avancées récentes en matière de politiques et de programmes municipaux se sont concentrées sur les enjeux relatifs aux égouts et aux eaux souterraines. Elles comprennent notamment de nouvelles politiques et de meilleures pratiques visant à réduire l'infiltration d'eaux souterraines et l'afflux vers les égouts sanitaires, qui ont permis de moderniser et d'améliorer certains réseaux d'égouts locaux. Malgré ces améliorations, il est probable que de vastes zones d'infiltration d'eaux souterraines ou d'exfiltration n'aient pas encore été repérées. La recherche sur la gestion des eaux pluviales urbaines a révélé que les améliorations au moyen d'infrastructures vertes augmentent généralement la recharge de la nappe souterraine, diminuent le ruissellement et augmentent le débit de base des cours d'eau. Toutefois, les infrastructures vertes peuvent avoir pour conséquence involontaire d'augmenter la charge de contaminants dans le système d'eaux souterraines urbaines. Une analyse des politiques et des données connexes montre que la gouvernance participative, combinée à une influence et un engagement marqués de la part des citoyens, peut accroître l'utilisation des infrastructures vertes, qui peuvent à leur tour jouer un rôle important en l'absence d'instruments réglementaires (chapitre 6).

Élaboration de modèles à plus grande échelle représentant les effets régionaux de l'eau souterraine sur la qualité de l'eau des Grands Lacs

En raison des difficultés liées à l'échantillonnage des eaux souterraines aux fins d'évaluations qualitatives et quantitatives, la modélisation est un outil important pour accroître l'échelle spatiale des évaluations et des prévisions. Il est nécessaire de prendre la recherche effectuée dans de petits sites précis et de l'adapter à l'échelle des cours d'eau,

des bassins versants et du bassin des Grands Lacs. Les progrès dans ce domaine comprennent des techniques de modélisation intégrant des bases de données sur les éléments nutritifs/contaminants à des systèmes d'information SIG. Pour faciliter la modélisation à plus grande échelle, des progrès ont été réalisés récemment en ce qui concerne la compréhension des mesures de contrôle du paysage sur les flux d'éléments nutritifs vers les eaux souterraines (chapitre 4). Il est prévu de développer un modèle intégré d'eaux souterraines/de surface pour le bassin, mais l'application au transport des éléments nutritifs nécessitera probablement des recherches supplémentaires.

Lorsqu'on aborde le potentiel de prévision des répercussions des changements climatiques sur les eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs, il s'avère essentiel d'améliorer la modélisation. Les données de terrain et les modèles ont été combinés pour étudier l'impact des changements climatiques sur le stockage des eaux souterraines dans un large éventail d'emplacements géographiques et d'échelles spatiales. Actuellement, la plupart des études rapportent des résultats à l'échelle du terrain ou de bassins petits/moyens. Malgré la variabilité des résultats, de nombreuses études menées à ces échelles ont permis de conclure que les systèmes d'eaux souterraines devraient être relativement résilients face aux effets des changements climatiques (chapitre 7). Les recherches menées à l'échelle régionale montrent l'incertitude et la variabilité spatiale de l'effet combiné des changements climatiques et de l'intensification de l'extraction d'eaux souterraines pour l'agriculture. Toutefois, la sensibilité du niveau des eaux souterraines aux changements climatiques dépend fortement des caractéristiques physiographiques locales et de l'incertitude dans les simulations de modèles. Les projections modélisées à l'échelle continentale n'en sont qu'à leurs débuts et sont encore rares et incertaines au Canada, notamment en ce qui concerne les conséquences sur les Grands Lacs (chapitre 7). L'une des premières études de modélisation hydrologique à grande échelle a été élaborée pour le Canada continental à l'aide du modèle HydroGeoSphere, qui offre une intégration eaux souterraines/de surface complète (chapitres 2 et 7). Le modèle a permis d'analyser l'écoulement régional des eaux souterraines pour l'ouest du Canada ainsi que le bilan hydrique pour les Grands Lacs. Le modèle est capable de simuler les eaux de drainage superficiel pour la majeure partie du Canada, malgré la représentation hydrostratigraphique très simplifiée et la faible résolution du maillage. Cette étude a mis en évidence d'importants systèmes d'écoulement des eaux souterraines à grande échelle ayant une incidence sur la disponibilité de l'eau douce à travers le pays, qui pourrait être touchée par les changements climatiques et avoir un impact sur la disponibilité des eaux souterraines (chapitre 7).

8.3 Nouveaux enjeux

Le rapport de 2016 est un examen complet de l'état des enjeux liés aux eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs. La plupart des enjeux importants ont été abordés dans cet examen, mais d'autres enjeux se sont quand même posés depuis.

Plusieurs « nouveaux » contaminants sont devenus plus préoccupants depuis le rapport de 2016. Les substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées sont un groupe de produits

chimiques utilisés pour fabriquer des produits résistants à la chaleur et aux taches, y compris les mousses extinctrices. Elles sont devenues une préoccupation sur le plan environnemental en raison de leur persistance et de leur toxicité potentielle à de faibles concentrations. D'autres composés non mentionnés dans le rapport de 2016, qui doivent être considérés comme des contaminants des eaux souterraines très préoccupants, comprennent les phytoestrogènes (imitateurs d'œstrogènes), les produits dérivés des cultures agricoles et les pesticides néonicotinoïdes (p. ex. l'imidaclopride). Les microplastiques constituent également une « nouvelle » préoccupation pour les eaux souterraines, car ils peuvent adsorber d'autres contaminants et parcourir de grandes distances dans les milieux karstiques et rocheux fracturés (chapitre 3).

Les écosystèmes d'eaux souterraines n'étaient pas couverts à l'origine par le rapport de 2016, mais ils commencent à faire l'objet d'une certaine attention. Des progrès ont été réalisés récemment permettant de mieux connaître ces écosystèmes, mais pas dans le bassin des Grands Lacs. Les nouvelles études ont porté notamment sur des analyses génomiques et les altérations des écosystèmes à cause de contaminants toxiques et de changements dans l'utilisation des terres ainsi que sur l'évaluation de la façon dont les organismes qui dépendent des eaux souterraines peuvent influencer sur les propriétés hydrauliques des systèmes d'écoulement des eaux souterraines ou subir leur influence (chapitre 5).

Les ressources de données ouvertes permettent d'évaluer plus facilement les besoins en eau concurrents et interdépendants des villes urbaines. Outre l'accès aux données, des outils et des technologies de visualisation faciles à utiliser sont des moyens essentiels d'améliorer les ressources de données ouvertes et équitables. Les administrations pourraient envisager d'intégrer des plateformes de données ouvertes universelles, car ces ensembles de données ouvertes amélioreraient la capacité d'effectuer des analyses et permettraient ainsi une meilleure compréhension du système d'eau urbain dans son ensemble.

8.4 Principales lacunes, besoins scientifiques et contraintes – mise à jour

Bien que des progrès aient été réalisés en ce qui concerne les enjeux scientifiques soulevés dans le rapport de 2016 (voir la section 8.2), certains enjeux n'ont pas été abordés ou nécessitent davantage de travail, et d'autres sont limités pour différentes raisons. Une description de ces lacunes et besoins récurrents, classés en fonction de ce qui est nécessaire, est fournie ci dessous.

Davantage de renseignements (données/surveillance)

De loin, la lacune/le besoin le plus communément identifié dans ce rapport est le manque de données et de surveillance de base. Ces connaissances sont essentielles pour élaborer des politiques et des lignes directrices, quantifier les charges, améliorer l'exactitude des modèles et réduire l'incertitude. Les données de base pourraient également être utilisées pour évaluer les conditions et suivre les progrès quant aux lignes directrices et aux politiques déjà mises en œuvre. Les technologies évoluent en vue de permettre la collecte de données à haute fréquence et, dans certains cas, la collecte de données télémessurées

en temps réel. Ces technologies ont le potentiel de révéler des tendances et des processus dans les eaux souterraines à une échelle spatiale et temporelle beaucoup plus fine qu'il n'était possible de le faire auparavant, ce qui permettrait de mieux soutenir la gestion, la prise de décision et la planification liées à la qualité des eaux souterraines. Toutefois, pour tirer parti de ces avancées, il faut mettre en place une infrastructure et du soutien dans le but de pouvoir collecter, traiter, intégrer, stocker, visualiser et manipuler ces vastes ensembles de données et de fournir l'accès à ceux-ci.

Par ailleurs, il peut être difficile de rassembler et de synthétiser les données provenant de plusieurs organismes à l'échelle du bassin des Grands Lacs. Les sites contaminés, par exemple, relèvent de divers cadres réglementaires, de sorte que la quantité et le type de données disponibles varient. Une base de données nationale contenant tous les types de données faciliterait les efforts de gestion et de recherche (chapitre 6). D'autres aspects de la recherche sur les contaminants dans les eaux souterraines du bassin des Grands Lacs nécessitent également plus d'efforts. La quantification des charges de certains contaminants à l'échelle régionale serait un atout pour les évaluations des effets; toutefois, des méthodes à jour sont nécessaires pour associer les données sur les sources de contaminants à la modélisation hydrologique (chapitre 3).

En ce qui concerne les écosystèmes dépendant des eaux souterraines, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour repérer les zones d'émergence d'eaux souterraines locales associées à des habitats essentiels, ce qui nécessite un effort coordonné de la part de divers intervenants en vue de recueillir et de partager les connaissances locales. L'influence des tendances spatiales ou de l'inégalité de l'émergence de l'eau souterraine dans les cours d'eau et les milieux littoraux sur la structure des communautés et la fonction écosystémique n'est pas bien comprise pour les espèces aquatiques qui ne sont pas perçues comme ayant une valeur commerciale/récréative (chapitre 5).

Le besoin de mieux connaître les eaux souterraines en milieu urbain, en particulier en ce qui concerne les systèmes d'infiltration des eaux pluviales, les projets d'infrastructure souterraine et la résolution des problèmes liés aux eaux souterraines, p. ex. les inondations de sous sols à l'échelle régionale, se fait de plus en plus sentir. Des infrastructures vertes pour les eaux pluviales bien conçues et bien situées peuvent potentiellement assurer une gestion durable des eaux pluviales en améliorant la recharge de la nappe. Toutefois, l'impact des eaux pluviales sur les eaux souterraines réceptrices n'est généralement pas mesuré. On ne connaît pas l'impact de cet apport d'eau supplémentaire, peut être de qualité dégradée, dans le système d'eaux souterraines par le biais d'infrastructures vertes, et cela constitue une lacune dans les connaissances sur les bilans hydriques urbains. En outre, il est nécessaire de mieux comprendre l'influence des eaux pluviales sur la qualité des eaux souterraines et le lien possible avec les préoccupations en matière de santé humaine et de l'environnement dans les zones urbaines. Des études récentes sur les eaux pluviales et les infrastructures vertes utilisées pour leur gestion se sont concentrées sur les changements aux débits d'eau de surface et les paramètres connexes, ainsi que sur la qualité des eaux de surface. Malgré cela, on sait peu de choses sur l'impact de l'émergence

d'eaux souterraines plus loin en aval, dans les cours d'eau et les lacs urbains. Les changements qualitatifs et quantitatifs dans les eaux souterraines causés par les eaux pluviales ont encore été moins étudiés (chapitre 6).

Pour mieux comprendre les effets cumulatifs des changements climatiques, de l'utilisation des terres et du développement urbain sur le système hydrologique, il faut obtenir davantage de renseignements sur la manière dont les facteurs de stress anthropiques influent sur la qualité des eaux souterraines et leur quantité. Il est également nécessaire d'assurer une surveillance à long terme de toutes les composantes hydrologiques et des températures du sol afin de mieux comprendre les bassins versants soumis à des facteurs de stress et la manière dont ils pourraient être touchés par les changements climatiques, notamment en raison de la fonte des neiges et des effets du gel et du dégel du sol (chapitre 7). Davantage de données géologiques sont nécessaires pour améliorer la caractérisation hydrogéologique à l'échelle du bassin. De plus, il faut également un plus grand nombre de données écologiques, hydrologiques et géomorphologiques à petite échelle pour mieux comprendre les impacts échohydrologiques

Recherche

En ce qui concerne certains aspects de la science des eaux souterraines, les données de base ne suffisent pas à aborder les enjeux, et des travaux de recherches précis sont nécessaires pour mieux comprendre les dynamiques et les complexités inhérentes. Par exemple, pour mieux comprendre les contaminants présents dans les eaux souterraines, il faut étudier les effets aigus et chroniques sur les organismes sensibles, en particulier sur les populations endobenthiques (chapitre 5) et obtenir d'autres études publiées sur les effets écologiques de la contamination des eaux souterraines, en particulier pour les mélanges de contaminants (chapitre 3).

Le besoin le plus prioritaire en matière de nouvelles politiques et de nouveaux programmes est l'évaluation des effets urbains sur les eaux souterraines dans le cadre d'une approche globale pour les eaux urbaines. Compte tenu de la forte densité des projets de construction nécessitant d'importantes infrastructures souterraines, des lignes directrices et des politiques sont nécessaires pour préserver la quantité et la qualité des eaux souterraines (chapitre 6).

L'exfiltration provenant d'infrastructures d'égouts pluviaux pose un risque lié au rejet de substances toxiques et de pollution microbienne. En particulier, les modifications de la zone d'eaux souterraines près de la surface peuvent diminuer la distance de déplacement des contaminants, ce qui réduit leur atténuation et accroît l'exposition. Le présent examen a permis de constater qu'il n'y a pas de politiques ni de programmes sur le bassin des Grands Lacs visant à quantifier les fuites des égouts sanitaires municipaux vers les eaux souterraines, ou à quantifier les flux de contaminants à partir de sources urbaines vers les eaux souterraines, ce qui permettrait d'estimer les charges de contaminants dans les eaux souterraines (et les risques connexes) dans les zones urbaines et en aval à l'échelle du bassin versant. C'est pourquoi il faut à l'avenir étudier les changements hydrologiques

provoqués par les infrastructures d'égouts et la manière dont ils influent sur le risque de pollution souterraine (chapitre 6). Bien que des études récentes aient examiné directement la relation entre les contaminants dans les eaux pluviales et les contaminants dans les eaux souterraines, des recherches supplémentaires sont nécessaires sur le devenir, le transport et la persistance des contaminants des eaux pluviales qui s'infiltrent dans les eaux souterraines (chapitre 3).

Pour prévoir et modéliser les répercussions des changements climatiques sur les eaux souterraines dans le bassin des Grands Lacs, il est nécessaire de connaître l'effet des caractéristiques physiographiques locales sur les réactions du système hydrologique aux changements climatiques. Il pourrait également être important de tenir compte de l'impact combiné des changements climatiques (chapitre 7) et du développement urbain (chapitre 6) sur la quantité et la qualité des eaux souterraines, ainsi que de la vulnérabilité des sources d'eau potable. Pour mieux comprendre les répercussions des changements climatiques sur la qualité de l'eau (sur le terrain et par modélisation), des recherches supplémentaires pourraient être faites sur les différents types de contaminants (c. à d. les sources ponctuelles et diffuses, anthropiques et géogéniques) (chapitre 7).

Amélioration de la modélisation

En raison des difficultés liées à la collecte de données dans le milieu des eaux souterraines, la modélisation est un outil important, en particulier pour prévoir les répercussions des changements climatiques.

La quantification des charges de certains contaminants à l'échelle régionale serait un atout pour évaluer les effets des contaminants sur les eaux souterraines; cependant, de nouvelles méthodes sont nécessaires pour mettre à jour les données sur les sources de contaminants à l'aide de la modélisation hydrologique (chapitre 3).

Dans les milieux urbains, les préoccupations liées à l'exfiltration des égouts ne se limitent pas aux eaux souterraines, mais concernent aussi le transport de vapeurs depuis les conduits d'égouts jusqu'aux bâtiments. Il pourrait être envisagé de tester les vapeurs d'égout dans le cadre du modèle conceptuel du site dans les endroits à haut risque. De plus, il faut améliorer les modèles existants pour le calcul du bilan hydrique afin de mieux prendre en compte l'évapotranspiration et l'infiltration. Même si les infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales sont de plus en plus utilisées, des inquiétudes ont été soulevées quant à la possibilité qu'elles introduisent des polluants dans les eaux souterraines, ce qui est particulièrement important dans les zones urbaines où les nappes phréatiques sont peu profondes. Pour mieux comprendre les infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales et leur impact sur les eaux souterraines, il est recommandé d'utiliser des modèles à plusieurs échelles (chapitre 6).

On a besoin de réduire les incertitudes associées aux projections climatiques modélisées, car les différents scénarios et modèles climatiques peuvent varier de manière significative, et les résultats obtenus sont parfois même contradictoires, ce qui donne des réponses

hydrologiques et une dynamique des éléments nutritifs très variables. Le recours accru à la modélisation d'ensemble permet de réduire les incertitudes relatives aux prévisions climatiques grâce au calcul de la moyenne pour plusieurs scénarios d'émissions et de représentations. Il est nécessaire de mieux caractériser et de réduire davantage les incertitudes associées à la modélisation hydrologique. Par conséquent, il faut évaluer la sensibilité des différentes composantes hydrauliques ou les effets cumulatifs potentiels de multiples composantes hydrauliques sur la réaction aux changements climatiques. Des modèles entièrement intégrés qui représentent explicitement l'écoulement des eaux souterraines, le transport des contaminants et les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface sont nécessaires, et ils doivent être utilisés à une échelle suffisamment fine pour être significatifs en ce qui a trait aux processus écohydrologiques. De nouvelles méthodes sont nécessaires puisque les modèles de plus en plus complexes et exigeants sur le plan des calculs, et il faut souvent en arriver à un compromis entre la complexité et la représentativité des modèles (chapitre 7).

Dans le but de mieux comprendre les répercussions des changements climatiques sur la qualité de l'eau (sur le terrain et par modélisation), on a besoin de modèles pratiques pour appuyer la mise en œuvre ainsi que l'adaptation aux changements climatiques. Les techniques de modélisation actuelles prennent du temps et nécessitent de grandes quantités de données. Des outils conviviaux faciliteraient la mise en œuvre par les gouvernements à l'échelle locale à des fins d'adaptation aux changements climatiques (chapitre 7).

Intégration de nouvelles technologies

Depuis le rapport de 2016, des progrès ont été réalisés en matière de technologie, de disponibilité et d'abordabilité des capteurs, ce qui permettra d'améliorer la surveillance des eaux souterraines. Afin de mieux tirer profit de ces données, il serait avantageux d'intégrer ces nouveaux capteurs aux technologies d'information et de communication en vue de gérer plus efficacement les données de terrain et de faciliter la prise de décision en temps opportun.