

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉVALUATION D'APPROCHES COMPLÉMENTAIRES POUR DÉTERMINER
LA CONNECTIVITÉ ENTRE LES MILIEUX HUMIDES ET L'EAU
SOUTERRAINE ET DE SURFACE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCE DE LA TERRE

PAR

RACHEL LAPLANTE

MAI 2021

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier ma famille et mes ami.e.s pour vos encouragements et votre amour. Merci les sœurs. Merci Gab, je t'aime, rien de plus, rien de moins.

Je tiens aussi à remercier ma directrice de recherche, Marie Larocque, pour ses conseils et son aide. Merci à l'équipe d'hydrogéologie de l'UQAM : Alice, Christelle, Emmanuel, Fanny, Fred, James, Julien, Jo, Marjo, Oli, Sab, Samuel, Simon, Sylvain et Trong. Je remercie plus particulièrement Marjolaine, Samuel, James et Julien pour votre accompagnement et soutien lors des sorties de terrain. Merci Samuel de m'avoir sauvée dans la tourbière Décarie. Merci Oli pour toutes les conversations profondes à chaque matin. Merci Jo de m'avoir accompagnée et soutenue tout le long du baccalauréat et de la maîtrise. Merci Sylvain pour ton soutien et les nombreuses pistes de solution. Je remercie aussi tout le personnel de l'UQAM qui m'a permis de faire cette maîtrise.

Je tiens également à remercier Michelle Garneau de m'avoir donné accès à son laboratoire pour l'analyse de sphaignes et à ses étudiant.e.s pour leur aide. Merci à Stéphanie Pellerin et ses étudiant.e.s pour leurs conseils pour l'analyse de la végétation dans les tourbières. Je remercie également les représentant.e.s des municipalités régionales de comté (MRC) et des organismes de bassins versants (OBV) pour leurs conseils et intérêt dans mon projet.

Ce mémoire a été possible grâce au financement du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), du Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FRQNT) et aux financements de recherche obtenus par

Marie Larocque auprès du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) pour le Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) dans la région des Laurentides et de la MRC les Moulins.

DÉDICACE

À mon psy,

sans qui je n'aurais pu finir cette maîtrise.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xiv
RÉSUMÉ	1
CHAPITRE I introduction	3
1.1 Problématique générale	3
1.2 État des connaissances.....	5
1.2.1 Définition	5
1.2.2 Types de milieux humides	6
1.2.3 Fonctions et services écosystémiques des milieux humides.....	8
1.2.4 Connectivité entre les milieux humides et l'eau souterraine	10
1.2.5 Approches pour évaluer la connectivité.....	12
1.3 Objectifs de la recherche	13
CHAPITRE II Description de la zone d'étude.....	15
2.1 Localisation et physiographie.....	15
2.2 Contexte géologique	17
2.2.1 Géologie du roc	17
2.2.2 Géologie du quaternaire	19
2.3 Hydrographie et contexte hydrogéologique.....	22
2.4 Occupation du territoire et milieux humides	24
CHAPITRE III MÉTHODOLOGIE	27
3.1 Solides totaux dissous et végétation indicatrice dans les tourbières.....	27
3.1.1 Description de la méthode.....	27

3.1.2	Travaux de terrain	29
3.1.3	Analyses statistiques	33
3.1.4	Transformation de la CE en STD.....	33
3.2	Identification cartographique de la connectivité hydrogéologique	37
3.2.1	Étapes méthodologiques.....	37
3.2.2	Données nécessaires.....	40
3.2.3	Travaux de terrain	40
CHAPITRE IV Résultats		43
4.1	Description des tourbières étudiées	43
4.2	Conductivité électrique et solides totaux dissous	48
4.3	Connectivité des tourbières à l'eau souterraine évaluée avec la méthode STD- végétation	50
4.4	Classement des milieux humides selon leur élévation médiane	52
4.5	Position des milieux humides dans les dépôts meubles	52
4.6	Position des milieux humides dans le réseau hydrographique	54
4.7	Hydrodiversité des milieux humides selon la méthode cartographique	56
4.8	Classement des tourbières étudiées avec la méthode cartographique	57
4.9	Connexion aux dépôts meubles sous-jacents et au réseau hydrographique des marais et marécages	59
CHAPITRE V Discussion.....		61
5.1	Caractéristiques des tourbières étudiées	61
5.2	Conversion de la conductivité électrique en solides totaux dissous	63
5.3	Connexion des milieux humides aux dépôts meubles	65
5.4	Connexion des milieux humides au réseau hydrographique	66
5.5	Hydrodiversité des milieux humides	68
5.6	Avantages et limites des approches	71
5.7	Comparaison des deux méthodes.....	75
5.8	Utilisation des deux approches dans d'autres environnements géo-climatiques	78
CHAPITRE VI CONCLUSION		81

ANNEXE A	Analyses statistiques de l'épaisseur de tourbe.....	83
ANNEXE B	Analyses statistiques de la profondeur de nappe dans les tourbières...	85
ANNEXE C	Fréquence d'observation de la végétation indicatrice.....	87
ANNEXE D	Analyses statistiques de la conductivité électrique.....	88
ANNEXE E	Position des milieux humides dans les dépôts meubles	91
ANNEXE F	Position des milieux humides dans le réseau hydrographique	95
ANNEXE G	Classement des tourbières étudiées avec la méthode cartographique...	99
RÉFÉRENCES.....		103

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Types de connexion possibles avec l'eau souterraine.....	12
Figure 2.1 : Localisation de la zone d'étude et des MRC d'après MRNF (2005)	16
Figure 2.2 : Topographie de la zone d'étude d'après le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN;2016).....	17
Figure 2.3 : Géologie du roc d'après MERN (2019)	19
Figure 2.4 : Géologie des dépôts meubles et du substrat rocheux d'après MERN (2020b)	22
Figure 2.5 : Bassins versants principaux sur la zone d'étude d'après MDDELCC (2017c)	23
Figure 2.6 : Occupation du sol (MDDELCC, 2017b).....	25
Figure 2.7 : Cartographie des milieux humides potentiels selon MELCC (2019b)....	26
Figure 3.1 : Approche pour déterminer l'apport d'eau souterraine dans les tourbières d'après <i>Larocque et al.</i> (2016).....	29
Figure 3.2 : Localisation des 46 tourbières étudiées	29
Figure 3.3 : Schéma du cheminement suivi dans les tourbières pour identifier la végétation indicatrice et de la localisation des stations lors des travaux de terrain	31
Figure 3.4 : a) Schéma du puits et du piézomètre, b) Mesure de la CE dans le puits et le piézomètre	32
Figure 3.5 : Milieux humides étudiés pour la comparaison avec la méthode cartographique.....	41
Figure 4.1 : Épaisseur maximale de tourbe dans toutes les tourbières étudiées	44
Figure 4.2 : Matériaux géologiques sous-jacents aux tourbières. Les tourbières sont regroupées selon leur proximité.....	46
Figure 4.3 : Répartition des tourbières avec végétation indicatrice d'un apport d'eau souterraine	48
Figure 4.4 : Connectivité au réseau hydrographique et aux dépôts meubles selon l'élévation pour tous les milieux humides de la zone d'étude. RT : Roc et till, SaG : Sable et gravier, ASi : Argile et silt, P: cours d'eau passant dans les milieux humides, S: cours d'eau commençant et sortant des milieux humides et LR: lacs et rivières partageant une portion de périmètre avec les milieux humides	56
Figure 5.1 : Répartition des milieux humides dans un bassin versant fictif selon leur hydrodiversité, adaptée de <i>Rosa et al.</i> (2018) pour la région d'étude. Le pourcentage représente la superficie couverte par les milieux humides à l'échelle régionale. Les valeurs en « km ² » représentent la superficie médiane des milieux humides alors que les valeurs en « m » représentent l'élévation médiane des milieux humides.....	69

Figure 5.2 : Répartition de l'hydrodiversité des milieux humides sur la zone en fonction des neuf catégories	71
Figure 5.3 : Connexion entre les tourbières de la première méthode et l'eau souterraine avec un facteur de 0,76 et la valeur critique de 22 mg/L.	77
Figure 5.4 : Connexion de l'ensemble des milieux humides à l'eau souterraine	78
Figure A.1 : Épaisseurs de tourbe selon la province géologique (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,05$)	83
Figure A.2 : Épaisseurs de tourbe selon que la mesure est prise près du bord de la tourbière ou au centre de la tourbière (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,05$).....	83
Figure A.3 : Épaisseur de tourbe en fonction de a) la distance du bord de la tourbière et b) la profondeur maximale de la nappe. Un modèle linéaire a été appliqué pour déterminer si la pente est statistiquement différente de « 0 ».	84
Figure B.1 : Profondeur de la nappe en fonction de la province géologique (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p > 0,05$).....	85
Figure B.2 : Profondeur de la nappe en fonction de la position dans la tourbière (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p > 0,05$).....	85
Figure B.3 : Profondeur de la nappe dans la tourbe en fonction de la distance du bord de la tourbière. Un modèle linéaire a été appliqué pour déterminer si la pente est statistiquement différente de « 0 »	86
Figure C.1 : Nombre de stations où la végétation indicatrice a été observée selon a) l'unité géologique, b) les matériaux géologiques sous-jacents aux tourbières et c) la position dans la tourbière	87
Figure D.1 : CE selon l'utilisation d'un piézomètre ou d'un puits (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,05$)	88
Figure D.2 : CE en fonction de l'unité géologique (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,05$)	88
Figure D.3 : CE en fonction a) de la profondeur de la nappe, b) du jour julien, c) de la latitude, d) de la longitude, e) des précipitations le jour même et f) des précipitations le jour précédent. Un modèle linéaire a été appliqué pour déterminer si la pente est statistiquement différente de « 0 »	89
Figure E.1 : Position des tourbières dans les dépôts meubles distribués selon la catégorie d'élévation. RT : Roc et till, SaG : Sable et gravier et ASi : Argile et silt..	91
Figure E.2 : Comparaison de l'accumulation de flux selon la connexion à différents types de dépôts meubles. ASi : Argile et silt, RT : Roc et till et SaG : Sable et gravier	93
Figure F.1 : Connectivité avec le réseau hydrographique selon la classe d'élévation. P: cours d'eau passant dans les milieux humides, S: cours d'eau commençant et sortant des milieux humides et LR: larges cours d'eau partageant une portion de périmètre avec les milieux humides	95
Figure F.2 : Comparaison de l'accumulation de flux selon le type de connexion au réseau hydrographique. S : cours d'eau commençant et sortant des milieux humides, P : cours d'eau passant dans les milieux humides et LR : lacs et rivières.....	97

Figure G.1 : Connexion aux dépôts meubles selon l'élévation pour les tourbières étudiées. RT : Roc et till, SaG : Sable et gravier et ASi : Argile et silt	99
Figure G.2 : Connexion au réseau hydrographique selon l'élévation pour les tourbières étudiées à l'aide de la première méthode. P: cours d'eau passant dans les milieux humides, S: cours d'eau commençant et sortant des milieux humides et LR: lacs et rivières partageant une portion de périmètre avec les milieux humides	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Espèces végétales et associations d'espèces indicatrices d'un apport d'eau souterraine, d'après Munger <i>et al.</i> (2014).....	28
Tableau 3.2 : Dépôts de surface associés aux catégories du premier critère dans la méthode de Rosa <i>et al.</i> (2018).....	38
Tableau 3.3 : Données nécessaires et sources utilisées pour l'analyse spatiale décrite par Rosa <i>et al.</i> (2018).....	40
Tableau 4.1 : Nombre d'observations des différents matériaux géologiques sous-jacents aux tourbières.....	45
Tableau 4.2 : Nombre d'observations d'espèces végétales indicatrices d'un apport d'eau souterraine.....	47
Tableau 4.3 : Nombre de stations correspondant à des apports d'eau souterraine confirmés, potentiels et limités pour différents facteurs de conversion ou CE seuil ..	51
Tableau 4.4 : Nombre de fois où la végétation est présente, mais que les STD ne dépassent pas la valeur critique et nombre fois où les STD dépassent la valeur critique, mais que la végétation indicatrice est absente pour chacun des facteurs de conversion et CE seuil ..	51
Tableau 4.5 : Catégories d'élévation qui permettent de diviser les milieux humides en quatre classes égales.....	52
Tableau 4.6 : Répartition de tourbières selon les catégories d'élévation de la méthode cartographique.....	57
Tableau 4.7 : Connexion aux dépôts meubles sous-jacents et au réseau hydrographique pour les différents milieux humides étudiés sur le terrain à des fins de comparaison avec la méthode cartographique. RT : Roc et till, SaG : Sable et gravier, ASi : Argile et silt, P: cours d'eau passant dans les milieux humides, S: cours d'eau commençant et sortant des milieux humides et LR: lacs et rivières partageant une portion de périmètre avec les milieux humides ..	60
Tableau 5.1 : Source des données de la cartographie des milieux humides potentiels 2019 d'après MELCC (2019a) ..	74
Tableau E.1 : Nombre de milieux humides, aire médiane (km ²), élévation médiane (m), étendue médiane de l'élévation (m) et accumulation de flux médiane selon la connexion aux dépôts meubles ..	92
Tableau F.1 : Nombre de complexes de milieux humides, aire médiane (km ²), élévation médiane (m), étendue médiane de l'élévation (m) et accumulation de flux médiane selon le type de connexion au réseau hydrographique.....	96

Tableau G.1 : Nombre de tourbières, aire médiane (km ²), élévation médiane (m), étendue médiane de l'élévation (m) et accumulation de flux médiane selon le type de connexion aux dépôts.....	100
Tableau G.2 : Nombre de tourbières, aire médiane (km ²), élévation médiane (m) étendue médiane de l'élévation (m) et accumulation de flux médiane selon le type de connexion au réseau hydrographique.....	102

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CE : Conductivité électrique

MDDEP : Ministre du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs

MDDELCC : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

MELCC : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

MERN : Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles

MHH : Milieux humides et hydriques

MRC : Municipalité régionale de comté

OBV : Organisme de bassins versants

PACES : Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines

STD : Solides totaux dissous

RÉSUMÉ

Les milieux humides sont définis comme des écosystèmes saturés en eau pendant une période de l'année, ayant une végétation hygrophyte et un sol hydromorphe. Ils subissent des pressions grandissantes en raison des changements climatiques et des activités humaines, ce qui a un impact sur leurs fonctions hydrologiques. Il est difficile d'estimer cet impact et donc de cibler les milieux humides à protéger prioritairement. Peu de méthodes permettent d'identifier la connexion entre les milieux humides et les aquifères, mais elles sont nécessaires pour assurer la protection des milieux humides et la gestion durable de la ressource en eau. L'objectif de cette recherche était d'évaluer différentes méthodes pour déterminer la connectivité entre les milieux humides et l'eau souterraine afin d'identifier les milieux humides à protéger prioritairement à l'échelle régionale. La zone d'étude correspond à la région des Laurentides (12 550 km²; Québec, Canada). Elle est principalement couverte par le Bouclier canadien, mais d'importants aquifères granulaires se trouvent dans de nombreuses vallées. Les milieux humides couvrent 8% de la région. La première méthode est une méthode de terrain qui permet d'évaluer la connectivité entre l'eau souterraine et les tourbières à partir des solides totaux dissous et d'indicateurs biologiques. Les solides totaux dissous ont été mesurés et les indicateurs biologiques ont été échantillonnés dans 46 tourbières durant les étés 2019 et 2020. Les résultats suggèrent qu'il existe une connexion potentielle avec l'eau souterraine dans la majorité des tourbières étudiées. Toutefois, la méthode ne permet pas d'identifier les connexions pour les tourbières individuelles. La deuxième méthode qui est utilisée est une approche d'analyse spatiale (SIG) permettant d'évaluer l'*hydrodiversité* des milieux humides, soit la diversité dans le réseau hydrographique et de leur connectivité avec les sédiments avoisinants. La plupart des milieux humides dans les Laurentides sont connectés aux dépôts de till ainsi qu'au roc. Aussi, ils sont connectés au réseau hydrographique par des rivières. Le principal inconvénient de cette méthode est que la qualité des couches utilisées pour l'analyse spatiale affecte directement la qualité des résultats. Finalement, les résultats des deux méthodes suggèrent l'importance d'assurer la protection des milieux humides dans la région des Laurentides puisque leur connectivité à l'eau souterraine et l'eau de surface les rend vulnérables aux pressions qui s'exercent sur le cycle de l'eau.

Mots clés : Milieux humides, eau souterraine, eau de surface, Laurentides

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Problématique générale

Au Québec, les milieux humides occupent une superficie de 189 593 km² (Pellerin et Poulin, 2013). Ceux-ci sont définis comme des écosystèmes saturés en eau pendant une période de l'année, ayant une végétation hygrophyle et un sol hydromorphe. Ils jouent un rôle important dans les cycles de l'azote, du carbone et de l'eau. Ils offrent également plusieurs services à la société comme la purification de l'eau et la production de nourriture, qui découlent directement de leurs fonctions. Après les récifs coralliens, les milieux humides ont la plus grande valeur monétaire équivalente pour leurs services écosystémiques (Costanza *et al.*, 2014).

Depuis 1900, 64 à 71 % des milieux humides auraient été détruits sur l'ensemble de la planète (Davidson, 2014). Entre 1990 et 2011, 19 % des milieux humides ont été perturbés dans les Basses-Terres du Saint-Laurent au Québec (Poulin *et al.*, 2016). Les principales activités anthropiques qui les perturbent dans la province sont les activités agricoles et sylvicoles, ainsi que l'urbanisation, la culture de la canneberge, l'exploitation de la tourbe, le développement du réseau hydro-électrique et les activités minières et récréatives (Avard *et al.*, 2013; Pellerin et Poulin, 2013; Poulin *et al.*, 2016).

Les milieux humides sont également vulnérables aux changements climatiques (Kløve *et al.*, 2014), mais ils peuvent aussi contribuer à mitiger leurs impacts par la séquestration de carbone notamment (Moomaw *et al.*, 2018). Il est donc important de les protéger afin de maintenir leurs services écosystémiques.

En 2013, au Québec, seulement 8 % des milieux humides étaient protégés (Pellerin et Poulin, 2013). Afin d'améliorer la gestion durable des ressources en eaux et des différents milieux qui lui sont associés, le Québec s'est doté récemment de la Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques (MHH; MDDELCC, 2017a). Celle-ci impose, via la Loi sur l'eau (MDDEP, 2009), aux municipalités régionales de comté (MRC) d'élaborer un plan régional de protection sur les MHH d'ici juin 2022. Cependant, déterminer les milieux humides à protéger prioritairement peut s'avérer laborieux en raison de la variabilité de leurs fonctions.

Une approche possible pour prioriser les milieux humides à protéger implique d'évaluer leur connectivité avec l'eau souterraine, qui est définie par des échanges d'eau entre les milieux humides et la nappe d'eau souterraine. En effet, l'apport d'eau souterraine permet de maintenir les services et fonctions des milieux humides. Dans les dernières années, beaucoup d'approches permettant de calculer les échanges d'eau ont été développées et les approches sont toutefois souvent coûteuses et laborieuses, et nécessitent des travaux de terrain ou le développement de modèles. Au contraire, les méthodes qui permettent d'identifier les échanges sans les calculer sont généralement plus faciles à appliquer, plus rapides et plus abordables.

Dans le contexte actuel québécois et de l'application de la Loi concernant les MHH, le développement et l'adaptation de techniques d'évaluation de la connectivité entre les milieux humides et l'eau souterraine est nécessaire pour guider l'identification des milieux prioritaires, promouvoir la protection des milieux humides et faciliter la mise en œuvre d'une gestion durable de la ressource en eau et des milieux naturels. Le but

de cette étude est donc d'évaluer le potentiel de deux méthodes pour identifier les connexions entre les milieux humides et l'eau souterraine afin d'aider les gestionnaires du territoire dans le développement du plan de protection sur les MHH.

1.2 État des connaissances

1.2.1 Définition

Au Québec, la définition la plus utilisée des milieux humides est celle de Couillard et Grondin (1986) : « l'ensemble des sites saturés d'eau ou inondés pendant une période suffisamment longue pour influencer, dans la mesure où elles sont présentes, les composantes sol ou végétation ». Toutefois, il existe de nombreuses autres définitions de milieux humides (NRC, 1995; Keddy, 2010; Mitsch et Gosselink, 2015; Tiner, 2016). Selon Mitsch et Gosselink (2015), la difficulté de créer une définition unique peut être expliquée par :

- La variabilité des conditions hydrologiques au sein d'un même milieu humide ou entre différents milieux humides;
- L'influence des milieux aquatiques et terrestres en bordure des milieux humides;
- La diversité des espèces animales, végétales et microbiennes;
- La variété de leur taille;
- La disparité de leur position sur le continent et selon l'utilisation du territoire;
- Les modifications anthropiques qu'ils ont subies.

Néanmoins, la plupart des définitions se basent sur les trois mêmes critères, i.e. une nappe phréatique en surface ou près de la surface pendant au moins une partie de la période de croissance des végétaux, une végétation adaptée aux milieux humides ou une végétation tolérante aux périodes d'inondation, et un sol hydromorphe (Bazoge *et al.*, 2015).

1.2.2 Types de milieux humides

Il existe différents types de milieux humides reconnus au Canada : marécages, marais, tourbières ombrotrophes (bog), tourbières minérotrophes (fen), tourbières boisées, eaux peu profondes, prairies humides et étangs (NWWG, 1997). Les milieux humides peuvent être marins, estuariens, riverains, lacustres, palustres, isolés, forestiers ou non forestiers. Les facteurs principaux permettant de définir et distinguer les différents types de milieux humides sont l'hydrologie, la biologie végétale et la pédologie. Les milieux humides qui font l'objet de la présente recherche sont les marais, marécages et tourbières puisqu'au moment des travaux de terrain, seuls ces milieux humides étaient cartographiés.

1.2.2.1 Marais

Les marais sont des milieux humides caractérisés par une végétation herbacée (émergente, graminéoïde ou latifoliée) ayant un couvert supérieur à 25 %. Si présents, les arbres et arbustes ont un couvert inférieur à 25 % (Bazoge *et al.*, 2015). Les marais se développent sur une variété des sols allant des sols minéraux à organiques. Il peut y avoir présence de tourbe par accumulation de matière organique, mais son épaisseur ne dépasse pas 40 cm (NWWG, 1997). Les marais peuvent être en association avec des rivières, lacs, fleuves et mers, mais peuvent aussi être isolés hydrologiquement (Lapointe *et al.*, 2014). Ils sont caractérisés par la présence d'eau peu profonde en surface. Cette eau peut provenir d'un apport d'eau souterraine, des écoulements de surface (ruissellement ou apport par cours d'eau), des précipitations directes, des marées, des vagues de tempête et des courants littoraux. Le niveau d'eau dans un marais peut subir de grandes fluctuations. Celles-ci peuvent être quotidiennes, saisonnières ou annuelles. Elles sont causées par l'effet des marées, les inondations ponctuelles telles que les crues printanières, l'évapotranspiration, les variations du niveau de la nappe et les pertes par infiltration (NWWG, 1997). Les marais sont donc partiellement à

entièrement inondés, de façon temporaire ou permanente, et peuvent être temporairement asséchés par endroits.

1.2.2.2 Marécages

Les marécages sont des milieux humides caractérisés par une végétation ligneuse, arbustive ou arborescente ayant un couvert végétal supérieur à 25 % - 30 % (Bazoge *et al.*, 2015; NWWG, 1997). Comme les marais, le niveau d'eau dans les marécages peut varier en fonction d'inondations ponctuelles, de l'effet des marées et de la nappe d'eau souterraine. Toutefois, leurs périodes d'inondation sont habituellement plus courtes que celles des marais (Lapointe *et al.*, 2014). Les marécages peuvent avoir des sols minéraux mal drainés, possédant des marques d'oxydation telles que des mouchetures (CIC, 2019). Ils peuvent également avoir des sols organiques, formés de tourbe très décomposée et riche en débris d'arbres (NWWG, 1997). Les marécages peuvent être connectés au réseau hydrographique par des rivières, lacs, étangs ou fleuves, alors que d'autres peuvent être isolés. Ces derniers peuvent recevoir de l'eau par résurgence de l'eau souterraine riche en ions et par ruissellement (Lapointe *et al.*, 2014).

1.2.2.3 Tourbières

Les tourbières sont souvent classées selon leur alimentation en eau dominante. Les tourbières minérotrophes (fen) sont principalement alimentées par l'eau souterraine et l'écoulement de surface chargée en matières dissoutes. Elles sont donc riches en minéraux dissous, ce qui limite leur acidité. Au Québec, leur pH varie généralement entre 5,7 et 7,3 (Andersen *et al.*, 2011). Cette faible acidité et la richesse en nutriments favorisent la croissance des végétaux et une plus grande biodiversité. Leur végétation est principalement composée d'herbacées telles que les Cypéracées, et des bryophytes, plus particulièrement les mousses brunes (NWWG, 1997 ; Payette et Rochefort, 2001; Lapointe *et al.*, 2014). Les sphaignes sont peu présentes en raison du pH élevé. La nappe d'eau se situe la plupart du temps à leur surface qui est plutôt plane. Au cours

des millénaires, l'accumulation verticale de la tourbe peut engendrer une transition de tourbière minérotrophe à tourbière ombrotrophe qui peut être favorisée par un changement de conditions climatiques. Ceci peut mener à une déconnexion progressive entre la nappe et la portion ombrotrophe de la tourbière, réduisant ainsi l'apport de minéraux dissous au cœur de la tourbière (Payette et Rochefort, 2001). Les tourbières ombrotrophes sont très souvent entourées de portions minérotrophes où la connexion avec la nappe est maintenue, appelées « lagg ». Puisque l'eau des précipitations est pauvre en minéraux dissous, leur acidité est en général élevée, avec un pH variant entre 2,8 et 5,4 au Québec (Andersen *et al.*, 2011; Lapointe *et al.*, 2014). Leur végétation est principalement composée de sphaignes et d'éricacées (Lapointe *et al.*, 2014). La décomposition de la matière organique et plus particulièrement des sphaignes contribue à l'acidité du milieu (NWWG, 1997). Les tourbières ombrotrophes forment normalement un dôme plus élevé que le reste du paysage environnant (Payette et Rochefort, 2001).

Les tourbières peuvent également être classées en deux catégories selon leur position dans le paysage et leur forme : tourbières de pente et tourbières de dépression. Les tourbières de pente sont des tourbières formées sur des sols inclinés entre 5° à 30°, où les précipitations sont abondantes. Leur surface est au même niveau que le sol avoisinant. Les tourbières de dépression se sont développées dans des bassins et ont longtemps été considérées comme isolées des eaux souterraines (NWWG, 1997). Toutefois, des études récentes ont montré qu'elles peuvent recevoir de l'eau de la nappe ou l'alimenter (Ferlatte *et al.*, 2015; Bourgault *et al.*, 2019) et que l'apport d'eau souterraine dépend du gradient hydraulique dans l'aquifère voisin (Neff *et al.*, 2020).

1.2.3 Fonctions et services écosystémiques des milieux humides

Les fonctions d'un milieu sont l'ensemble des processus biologiques, chimiques et physiques ayant lieu entre le sol, l'eau, la faune et la flore (Turner *et al.*, 2000). Les fonctions des milieux humides dépendent de leur position géographique, de leur

position dans le bassin versant et de leur taille. L'importance de ces fonctions dépend du climat, de la qualité et de la quantité d'eau entrant dans les milieux humides, et de leur dégradation ainsi que celle du milieu environnant (Novitzki *et al.*, 1997). Les fonctions peuvent être divisées en trois catégories : hydrologie, qualité de l'eau et habitat. Les fonctions hydrologiques représentent les fonctions liées aux entrées, sorties et stockage d'eau dans les milieux humides. Dans certaines conditions, les milieux humides peuvent contribuer à réduire les inondations en stockant temporairement l'eau dans des dépressions ou en répartissant l'eau sur leur superficie. Ils peuvent ainsi diminuer le débit de crue en le répartissant sur une plus longue période (Carter, 1996). Les milieux humides peuvent aussi recharger la nappe souterraine ou être alimentés par celle-ci. Finalement, les milieux humides peuvent assurer la protection des berges et la stabilisation des sédiments. Toutefois, une recension de la littérature par Jutras et Plamondon (2020) suggère que les fonctions hydrologiques des milieux humides ne peuvent être généralisées en raison de la complexité des relations entre les contextes géomorphologique, hydrologique, hydrogéologique et les propriétés intrinsèques à chaque milieu humide. Les fonctions de qualité de l'eau contrôlent la qualité de l'eau stockée dans, ou sortant des milieux humides. Elles incluent notamment l'absorption des nutriments par la végétation, la rétention des sédiments et la sédimentation qui permettent de diminuer la turbidité, la quantité de sédiments en suspension dans le réseau hydrographique et la concentration des contaminants par sorption (Johnston, 1991; Hemon et Benoit, 1988; Carter, 1996). Les fonctions d'habitat sont celles associées au milieu physique qui assurent le maintien des populations fauniques et floristiques. Les milieux humides protègent de nombreuses populations végétales et animales en leur servant d'habitat et en les approvisionnant en eau et nourriture (Junk *et al.*, 2006). Ils sont également un lieu de reproduction pour de nombreuses espèces animales. En raison de leur richesse en nutriments et de leur forte production primaire, ils peuvent soutenir une grande chaîne alimentaire. Les milieux humides peuvent assurer le maintien d'une grande biodiversité (Lapointe *et al.*, 2014).

Les milieux humides offrent également de nombreux services écosystémiques définis comme l'ensemble des fonctions qui bénéficient les humains par l'écosystème (Kremen, 2005). Ils peuvent être divisés en quatre catégories : 1) services d'approvisionnement, 2) services culturels, 3) services de régulation, 4) services de support (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). D'abord, les milieux humides produisent de nombreux biens matériels tels que le bois pour la construction, la tourbe pour l'agriculture, les plantes pour les produits médicinaux, les petits fruits (p.ex., bleuets, chicoutés, canneberges) et de nombreux produits liés à la chasse et à la pêche. Ils font aussi partie des aménités environnementales sur le territoire et offrent de nombreux services culturels comme les activités touristiques, éducatives et spirituelles. De plus, les milieux humides apportent des services de régularisation qui permettent de modérer les phénomènes naturels grâce au bon fonctionnement des écosystèmes. Ceux-ci incluent, entre autres, la séquestration de carbone, l'amélioration de la qualité de l'eau, l'atténuation d'événements extrêmes comme les inondations, la régulation du climat, la recharge de la nappe et la pollinisation (Mitsch *et al.*, 2013). Toutefois, la nature et l'intensité de ces phénomènes varient d'un milieu humide à l'autre en fonction de leur position dans le paysage, des caractéristiques du sol, de la topographie, de leur condition initiale de saturation en eau et de leur gestion (Acreman et Holden, 2013). En outre, les milieux humides permettent de soutenir tous ces services grâce aux processus de support qui sont définis comme les processus qui maintiennent la vie sur Terre.

1.2.4 Connectivité entre les milieux humides et l'eau souterraine

La compréhension de la connectivité entre les milieux humides et l'eau souterraine s'est beaucoup développée au cours des dernières décennies, notamment en raison de l'augmentation des pressions anthropiques et climatiques (Sophocleous, 2002; Kløve *et al.*, 2014; Safeeq et Fares, 2016). Le pompage de l'eau souterraine, le drainage des terres agricoles, le changement d'utilisation du sol, l'ajout de fertilisants et de

pesticides sur les terres arables et les activités minières ne sont que quelques-unes des pressions anthropiques qui peuvent avoir un impact sur la connectivité nappe-milieu humide (Kløve *et al.*, 2011). Les milieux humides dépendants de l'eau souterraine sont sensibles aux variations de la nappe phréatique et à sa contamination (Brown *et al.*, 2011). La connectivité entre les milieux humides et l'eau souterraine peut être établie par l'identification de la présence d'échanges d'eau entre les deux réservoirs. Ces échanges ont lieu dans la zone hyporhéique définie comme la zone à l'interface des milieux humides et de l'eau souterraine (Boulton *et al.*, 1998; Hayashi et Rosenberry, 2002; Sophocleous, 2002; Kalbus *et al.*, 2006).

La connectivité entre un milieu humide et l'eau souterraine dépend en partie du niveau de la nappe par rapport au milieu humide (Neff *et al.*, 2020). Les échanges d'eau peuvent se faire par exfiltration de l'eau souterraine lorsque le niveau de la nappe phréatique est plus élevé que le niveau d'eau dans le milieu humide (Figure 1.1). Ils peuvent également se faire par infiltration de l'eau du milieu humide vers l'aquifère lorsque le niveau de l'eau dans le milieu humide est au-dessus du niveau piézométrique de la nappe. Les échanges dépendent aussi du contexte géomorphologique, de la conductivité hydraulique des matériaux en contact (minéral et organique) et du climat (bilan précipitation-évaporation; Winter, 1999; Sophocleous, 2002; Kløve *et al.*, 2011; Neff *et al.*, 2020).

Ainsi, la connectivité peut être variable dans l'espace et le temps. En effet, il est possible d'observer des échanges à la fois verticaux et horizontaux dans certaines tourbières du Québec en raison de leur configuration et des gradients hydrauliques (Ferlatte *et al.*, 2015). Aussi, le début et la durée de la période durant laquelle il y a une connectivité peuvent varier en raison des précipitations et de l'évapotranspiration notamment (Kløve *et al.*, 2011). Ainsi, au cours d'une même année, il est possible d'observer des modifications dans les échanges d'eau en raison de changements dans les gradients hydrauliques.

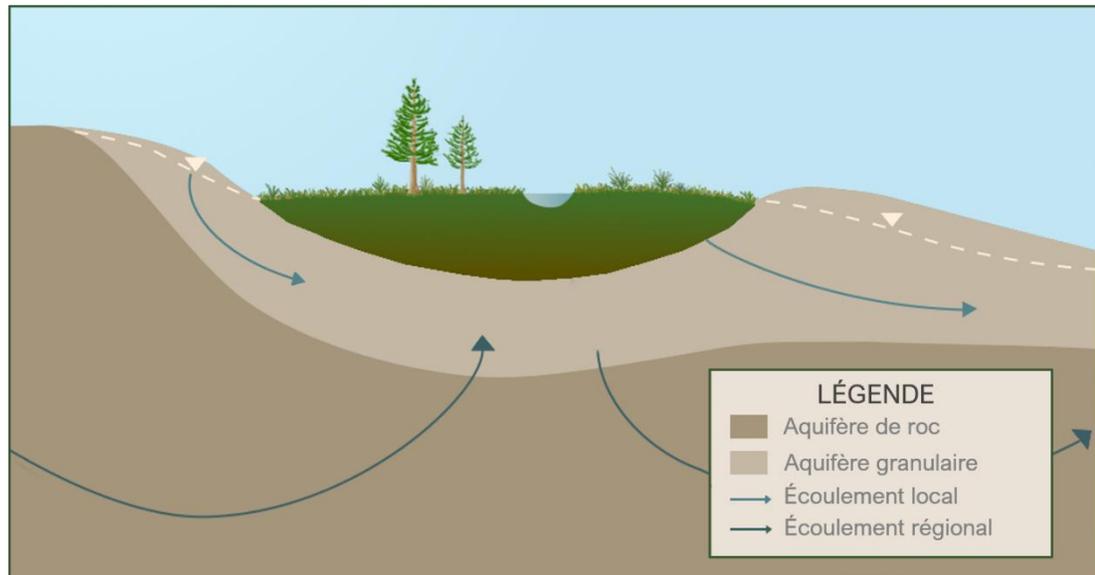


Figure 1.1 : Types de connexion possibles avec l'eau souterraine

1.2.5 Approches pour évaluer la connectivité

Plusieurs approches ont été développées ou adaptées au cours des dernières décennies afin d'étudier la connectivité entre les milieux humides et l'eau souterraine (Brodie *et al.*, 2007). Certaines techniques permettent de déterminer s'il y a présence d'une connectivité. C'est le cas notamment de l'observation d'indicateurs de végétation (Howard et Merrifield, 2010; Munger *et al.*, 2014), des gradients hydrauliques (Ferlatte *et al.*, 2015), de la température de l'eau (Lowry *et al.*, 2007), des traceurs chimiques naturels (pH, isotopes stables, isotopes radioactifs, etc. ; Brodie *et al.*, 2007), des analyses géophysiques (Barron *et al.*, 2014) ou d'une combinaison de paramètres (Larocque *et al.*, 2016). Certaines techniques permettent également d'établir la connectivité à l'aide d'approches d'analyse spatiale (Rosa *et al.*, 2018).

En plus de déterminer la présence d'échanges d'eau entre la nappe et les milieux humides, il est possible de quantifier ces échanges. D'autres techniques permettent de

calculer indirectement le flux à l'aide de l'équation de Darcy (Rosenberry et LaBaugh, 2008, telle qu'utilisé par Avard, 2013) ou en calculant le bilan hydrique du milieu humide (Fournier, 2008). Les modèles hydrologiques et hydrogéologiques permettent également d'estimer le flux d'eau échangé (Levison *et al.*, 2014; Neff et Rosenberry, 2018). Les modèles peuvent aussi être paramétrés à la lumière de mesures réalisées sur le terrain (Gilfedder *et al.*, 2015; Isokangas *et al.*, 2017; Furlan *et al.*, 2020; Irvine *et al.*, 2017).

La sélection d'une approche dépend de plusieurs facteurs incluant l'échelle de la zone d'étude, les coûts engendrés, la disponibilité des données, la simplicité d'utilisation et le type d'information que l'on veut retirer de l'étude.

1.3 Objectifs de la recherche

Les buts principaux de cette maîtrise sont : 1) de déterminer la connectivité entre les tourbières et l'eau souterraine dans les Laurentides, 2) de déterminer l'hydrodiversité de l'ensemble des milieux humides sur la zone d'étude et 3) d'évaluer le potentiel d'utilisation des deux méthodes utilisées pour identifier la connectivité et l'hydrodiversité par les gestionnaires du territoire.

La connectivité entre les tourbières et l'eau souterraine est déterminée selon une méthode basée sur des indicateurs chimiques et de végétation, développée par Larocque *et al.* (2016). Cette méthode a été choisie puisque les mesures pour identifier la connexion à l'eau souterraine sur le terrain sont simples et qu'elles semblent facilement applicables par des non-experts, tels que les gestionnaires du territoire. Il est attendu que la plupart des tourbières sur la zone d'étude soient connectées à l'eau souterraine en raison des grandes étendues de till présentes sur la zone d'étude.

L'hydrodiversité de l'ensemble des milieux humides est évaluée selon une adaptation de la méthode développée pour les tourbières par Rosa *et al.* (2018), basée sur une analyse cartographique des milieux humides et des milieux géologiques qui les entourent. Cette méthode a été sélectionnée puisqu'elle peut se faire sans avoir à prendre de mesures *in situ*. Il s'agit d'une méthode cartographique, qui une fois appliquée à une région, pourrait aisément être reproduite dans d'autres régions ayant un contexte hydrogéologique similaire. Il est attendu que l'hydrodiversité des milieux humides soit très variable puisque la zone d'étude est très grande et qu'elle couvre deux unités géologiques, donc deux contextes hydrogéologiques différents.

Cette recherche permettra ainsi de mieux comprendre la diversité des milieux humides et leur connectivité avec l'eau souterraine, qui pourraient être utilisées comme des critères pour déterminer les milieux humides à protéger en priorité sur le territoire québécois. La méthodologie pourra par ailleurs être utilisée par les MRC pour l'élaboration de leur Plan régional des milieux humides et hydriques dans le cadre de la Loi sur l'eau (MDDEP, 2009), modifiée par la Loi concernant la conservation des MHH.

CHAPITRE II

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Dans ce chapitre, la localisation et la physiographie de la région sont présentées, suivies du contexte géologique et de l'hydrographie, et finalement de l'occupation du territoire.

2.1 Localisation et physiographie

La zone d'étude se situe principalement dans les régions administratives des Laurentides et de Lanaudière, au nord-ouest de Montréal, entre le 45^e et le 47^e parallèle nord. Elle couvre les MRC d'Argenteuil, d'Antoine-Labelle, de la Rivière-du-Nord, des Laurentides, des Pays-d'en-Haut et Les Moulins, toutes des partenaires du PACES Laurentides-Les Moulins (Figure 2.1). Les MRC de Deux-Montagnes, Thérèse-De Blainville, Mirabel et Montcalm sont également incluses partiellement dans la zone d'étude qui se situe sur le territoire de quatre organismes de bassins versants (OBV) partenaires du PACES Laurentides-Les Moulins : Abrinord, COBALI, RPNS et COBAMIL. La superficie totale de la zone d'étude est de 12 550 km².

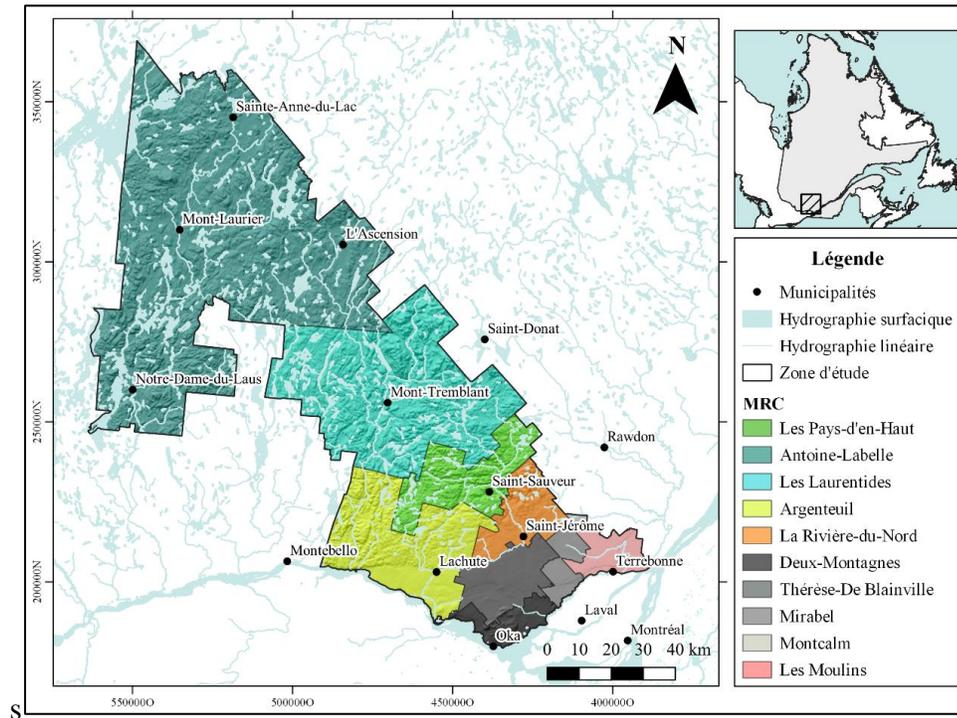


Figure 2.1 : Localisation de la zone d'étude et des MRC d'après MRNF (2005)

Le nord de la zone d'étude se trouvant sur le Bouclier canadien (cf. section suivante) a une topographie irrégulière et accidentée, marquée de hauts sommets et de vallées (Figure 2.2). L'altitude maximale est de 919 m et se retrouve sur le Mont-Tremblant tandis que l'altitude la plus faible est de 5 m et se situe au sud de la zone d'étude, sur la Plate-forme du Saint-Laurent. Celle-ci est caractérisée par de basses altitudes et un relief plutôt plat, avec une élévation maximale de 254 m seulement.

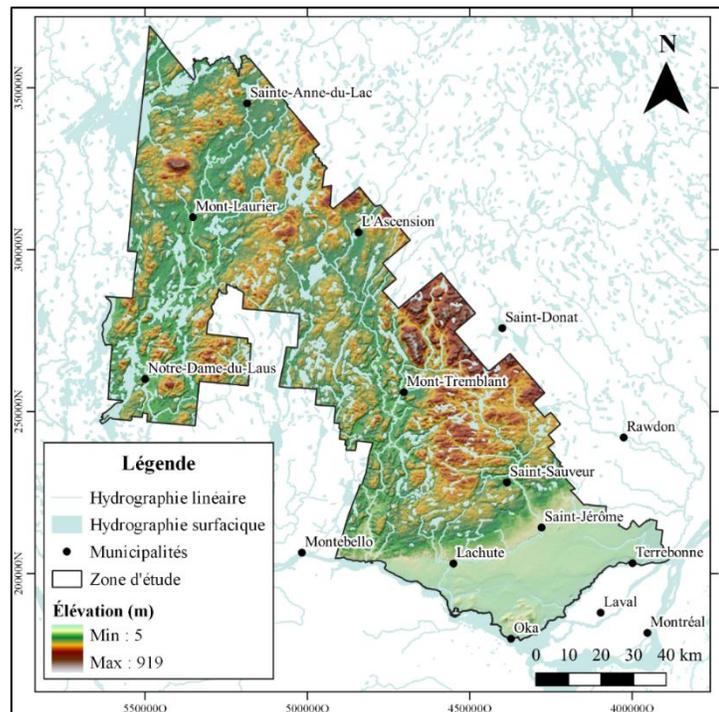


Figure 2.2 : Topographie de la zone d'étude d'après le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN;2016)

2.2 Contexte géologique

2.2.1 Géologie du roc

La zone d'étude traverse deux unités géologiques: le Bouclier canadien, plus particulièrement la Province de Grenville, et la Plate-forme du Saint-Laurent. Les roches de la Province de Grenville se sont formées lors de la dernière orogénèse du Bouclier canadien ayant eu lieu entre 1090 Ma et 980 Ma (Rivers, 2008). La collision entre Laurentia et un autre continent a créé une chaîne de montagnes composée de roches ignées intrusives et de roches sédimentaires de grades métamorphiques faibles à élevés et a formé le supercontinent Rodinia (Hynes et Rivers, 2010). La Province de

Grenville actuelle correspond aux racines de cette chaîne de montagnes ayant subi de l'érosion depuis plusieurs millions d'années.

Le socle du nord de la zone d'étude est principalement composé du paragneiss de la suite supracrustale de L'Ascension (Figure 2.3). Près de Notre-Dame-du-Laus, les roches de la suite supracrustale de L'Ascension sont alternées avec les marbres de la suite supracrustale du Sourd. Les gneiss charnockitiques du complexe de Mékinac sont surtout présents près de l'Ascension et s'étendent plus au sud jusqu'à Grenville-sur-la-Rouge. Au centre-est de la zone, les anorthosites forment le Mont-Tremblant. Celles-ci sont entourées de granitoïdes à orthopyroxènes. Les roches de la province de Grenville sont fracturées et ont une conductivité hydraulique plutôt faible qui dépend des caractéristiques des fractures.

Les roches de la province de Grenville se trouvent en discordance sous les roches de la Plate-forme du Saint-Laurent et les deux provinces sont séparées par des failles normales. La Plate-forme du Saint-Laurent se trouve au sud de la zone d'étude, le long de la rivière des Outaouais. Elle est composée d'une série de roches sédimentaires non déformées, formées au Néoprotérozoïque lors de la formation de rifts continentaux sous le supercontinent Rodinia et de l'ouverture de l'océan Iapetus. Des sédiments se sont accumulés sur la plateforme continentale et sur la marge du bassin océanique, puis se sont transformés en roches par diagenèse (Cawood, 2005). La Plate-forme est principalement composée de grès dolomitique et de dolomie du groupe de Beekmantown. L'ouest de la Plate-forme est marqué par les roches intrusives datant du Précambrien de la suite des Montérégiennes, près de Oka. L'est de la Plate-Forme, près de la MRC Les Moulins, présente principalement des calcaires du Groupe de Chazy ainsi que les shales d'Utica et des shales gris du groupe de Lorraine.

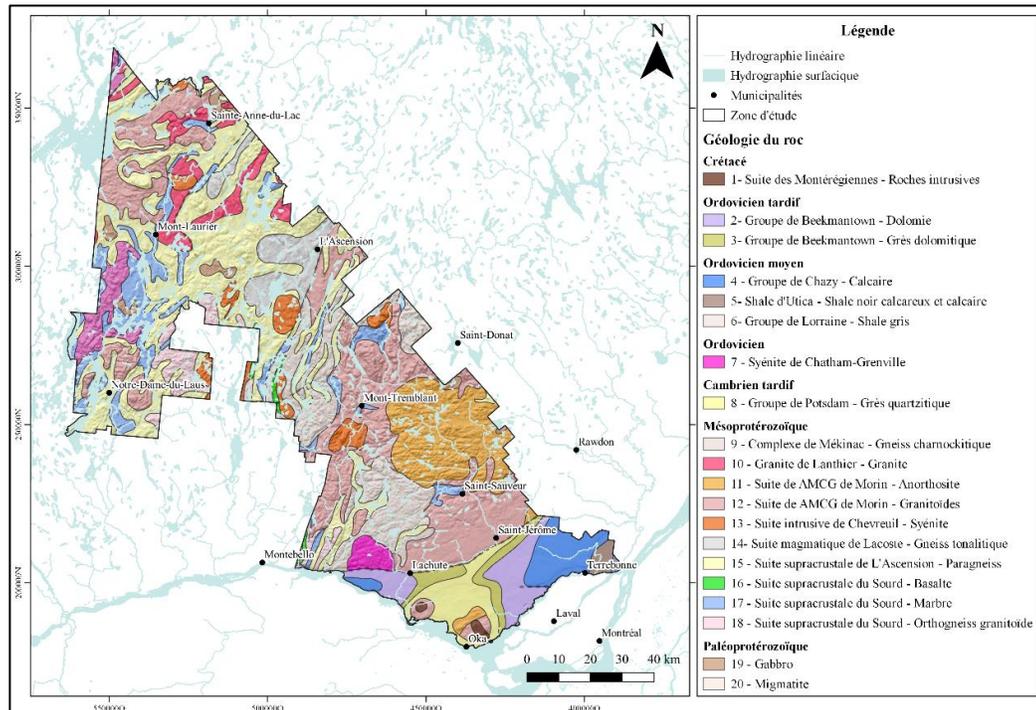


Figure 2.3 : Géologie du roc d'après MERN (2019)

2.2.2 Géologie du quaternaire

Une mise à jour de la cartographie des formations superficielles dans la région des Laurentides et Lanaudière a été réalisée très récemment (Randour *et al.*, 2019; Randour *et al.*, 2020).

Le roc (R) affleure principalement sur le Bouclier canadien, plus particulièrement dans les hauts topographiques comme au Mont-Tremblant et sur les flancs des collines (Figure 2.4). Il affleure également à Oka sur la plate-forme du Saint-Laurent. Il représente 6% des formations superficielles.

Les dépôts se trouvant sur la zone d'étude ont été mis en place lors de la dernière déglaciation. La majorité du Bouclier est recouverte de till en couverture mince (Tm;

34%) et de till en couverture continue (Tc; 24%) à matrice silto-sableuse à silto-argileuse. Deux faciès de till se trouvent sur le territoire : le premier est un till de fond mis en place alors que l'Inlandsis Laurentidien était à son maximum et le deuxième est un till d'ablation mis en place lors de sa fonte.

Les sédiments fluvioglaciaires (G; 6,5%) se sont mis en place lors de la fonte de l'Inlandsis et se retrouvent dans les vallées. Les sédiments d'épandages proglaciaires subaériens (Go) se trouvent dans les vallées au-delà de la limite de la mer de Champlain et sont composés de graviers, cailloux et blocs. Les sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique (Gs) se retrouvent dans un lac proglaciaire et ont été transportés dans des canaux se trouvant sous et dans l'Inlandsis. Les sédiments juxtaglaciaires formés de sable, gravier, cailloux et blocs, se retrouvent principalement sur le Bouclier où ils forment des eskers, deltas-kames et les crêtes de certaines moraines. Les sédiments de la Moraine de Saint-Narcisse (GxT) forment un diamicton à matrice sableuse.

Les sédiments glaciolacustre (3,5%) se sont mis en place pendant la déglaciation, alors que plusieurs lacs proglaciaires se formaient suite à un blocage fait par le glacier et les sédiments ou la topographie. Les sédiments fins d'eau profonde (LGA) se retrouvent dans le fond des rivières actuelles et sont composés d'argile et de silt. Les sédiments littoraux (LGB) composés de sable, silt et gravier se retrouvent le long des rivières. Les sédiments deltaïques (LGD), composés de sable fin à grossier, se retrouvent au nord de la moraine de Saint-Narcisse et forment des étendues vastes près de la vallée de la rivière du Lièvre. Lors de la fonte de l'Inlandsis Laurentidien au nord de la vallée du Saint-Laurent et sous l'effet de son poids, la croûte se trouvait sous le niveau de la mer. Cette dépression a permis à l'eau marine salée de transgresser dans la vallée du Saint-Laurent et dans les vallées du Bouclier canadien, sous la limite de 256 m, pour former la mer de Champlain. La Plate-forme du Saint-Laurent est donc actuellement recouverte de sédiments glaciomarins profonds (Mga; 4,6%) composé d'argile et de

silt, de sédiments deltaïques (MGd; 2%) composés de sable et gravier, et de plages (MGb; 3,4%) composés de sable et gravier.

La remontée isostatique de la croûte pendant la fonte de l'Inlandsis a mené au retrait de la mer de Champlain et à la formation du Lac à Lampsilis avec l'eau de fonte. Des sédiments deltaïques (Ld; <1%) et des sédiments littoraux (Lb; 1,3%) se retrouvent donc à de basses altitudes dans la vallée du Saint-Laurent.

Les alluvions actuelles (Ap; <1%) sont formées de sable et gravier, et se trouvent sur le bord du fleuve Saint-Laurent et des rivières telles que les rivières Rouge et du Nord. Les alluvions de terrasses fluviales (At; <1%) se trouvent le long des rivières actuelles qui montrent un abaissement du cours d'eau ou dans les plaines d'inondation des grandes rivières. Les alluvions anciennes (Ax; 2,6%) se trouvent dans les anciens méandres et chenaux de proto-rivières, incluant le fleuve du Saint-Laurent.

Les sédiments éoliens (Ed; <1%) forment de grandes étendues de sable fin telles que des deltas. Les sédiments organiques (O; 3,4%) se retrouvent dans les zones mal drainées, comme les chenaux abandonnés des rivières et les tourbières où l'eau empêche la dégradation rapide de la matière organique. Ils sont très présents dans les régions de Saint-Anne-du-Lac et Mont-Saint-Michel. Les dépôts de versant (Cg; <1%) sont principalement observés le long des rivières et sont composés de silts et d'argiles remaniées de la mer de Champlain.

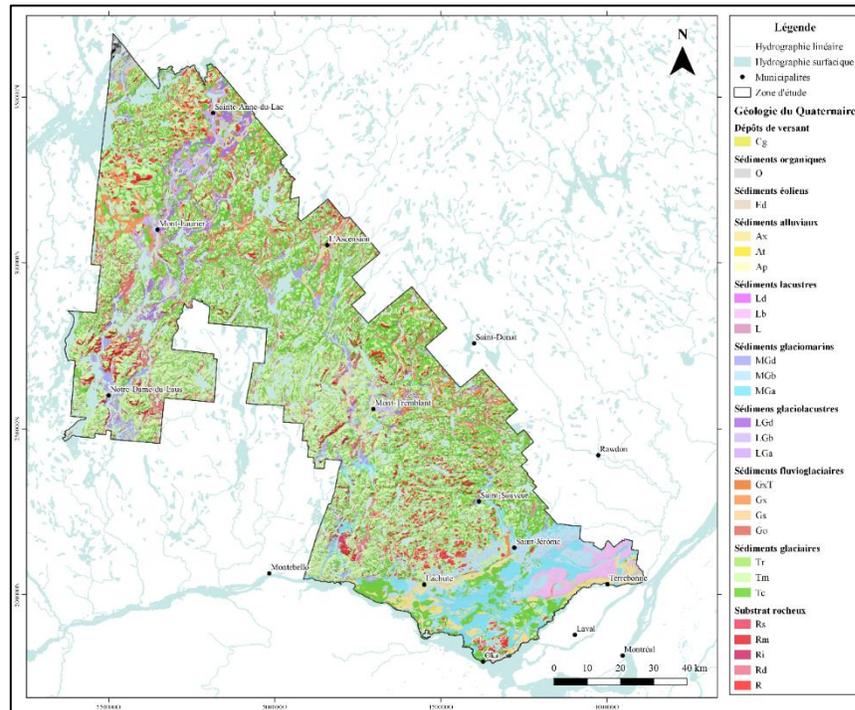


Figure 2.4 : Géologie des dépôts meubles et du substrat rocheux d'après MERN (2020b)

2.3 Hydrographie et contexte hydrogéologique

Les bassins versants qui couvrent la plus grande superficie du territoire sont ceux des rivières du Lièvre, Rouge, du Nord, Mascouche, Petite-Nation et du Chêne (Figure 2.5). Les rivières principales qui s'écoulent dans la zone d'étude sont la rivière Gatineau, la rivière du Lièvre, la rivière Rouge, la rivière du Nord et la rivière Mascouche. L'écoulement de ces rivières se fait du nord-ouest vers le sud-est, en direction de la rivière des Outaouais. Localement, l'écoulement se fait des hauts topographiques vers les vallées. Le Bouclier canadien est couvert de nombreux lacs et rivières. Les lacs et rivières sont moins présents sur la Plate-forme du Saint-Laurent en raison de sa topographie plane.

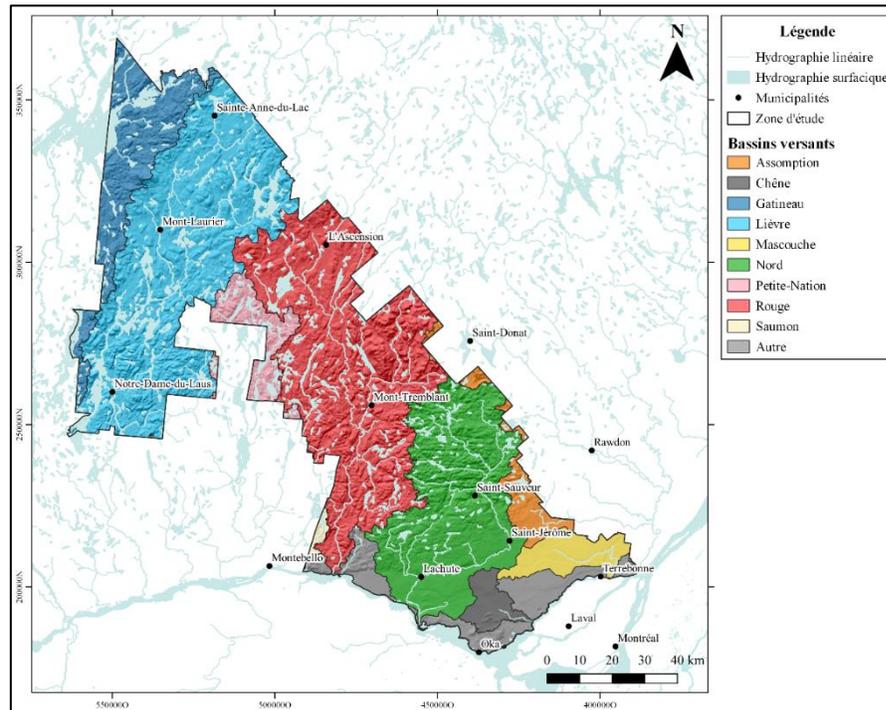


Figure 2.5 : Bassins versants principaux sur la zone d'étude d'après MDDELCC (2017c)

Le roc fracturé du Bouclier canadien forme un aquifère généralement à nappe libre à l'échelle régionale. Sa conductivité hydraulique moyenne est de $1,6 \times 10^{-5}$ m/s (Larocque *et al.*, 2019), mais celle-ci est très variable dans l'espace. Les dépôts de till sont présents en couche mince sur une très grande partie du territoire. Ils sont généralement perméables et de faible épaisseur, ce qui favorise la recharge de l'aquifère de roc. Les dépôts fluvioglaciaires et alluvionnaires dans le fond des vallées sur le Bouclier canadien forment des aquifères locaux à nappe libre, isolés les uns des autres, mais parfois en lien hydraulique avec l'aquifère de roc fracturé sous-jacent. Les principaux aquifères granulaires se retrouvent dans les vallées des trois rivières principales, soit la Lièvre, la Rouge et du Nord. Ces conditions sont propices aux connexions entre les rivières et l'eau souterraine. Des dépôts argileux sont également

présents dans la vallée de la Lièvre, créant localement des aquifères granulaires captifs. Les roches sédimentaires de la Plate-forme du Saint-Laurent sont recouvertes de dépôts argileux relativement continus et peu perméables qui limitent la recharge de l'aquifère rocheux. Globalement, l'écoulement de l'eau souterraine suit la topographie. À l'échelle locale, l'eau s'écoule des hauts topographiques vers les talwegs.

2.4 Occupation du territoire et milieux humides

La zone d'étude est dominée par les milieux forestiers (73%). Ils se situent principalement sur le Bouclier canadien, là où l'urbanisation est plus faible (Figure 2.6). Les forêts de feuillus représentent 55% des massifs forestiers, 38% sont des forêts mixtes et 7% sont des forêts de résineux (SIEF, 2018). Les milieux agricoles, qui couvrent 9% du territoire, se trouvent presque exclusivement sur la Plate-forme du Saint-Laurent puisque le terrain y est assez plat et que la géologie est propice pour ce type d'activités. On les retrouve également dans les vallées plus au nord. Les milieux aquatiques s'étendent sur 8% du territoire et se retrouvent dans les creux topographiques. Les milieux urbains (6%) sont majoritairement localisés au sud de la zone d'étude, près de l'Île de Montréal et des grandes routes. Pour ce qui est des carrières et des sols dénudés, ils ne représentent que 0,3% du territoire. Finalement, les milieux humides représentent 5% du territoire. Toutefois, une cartographie plus récente des milieux humides suggère qu'ils représentent plutôt 8% de la zone d'étude (MELCC, 2019b).

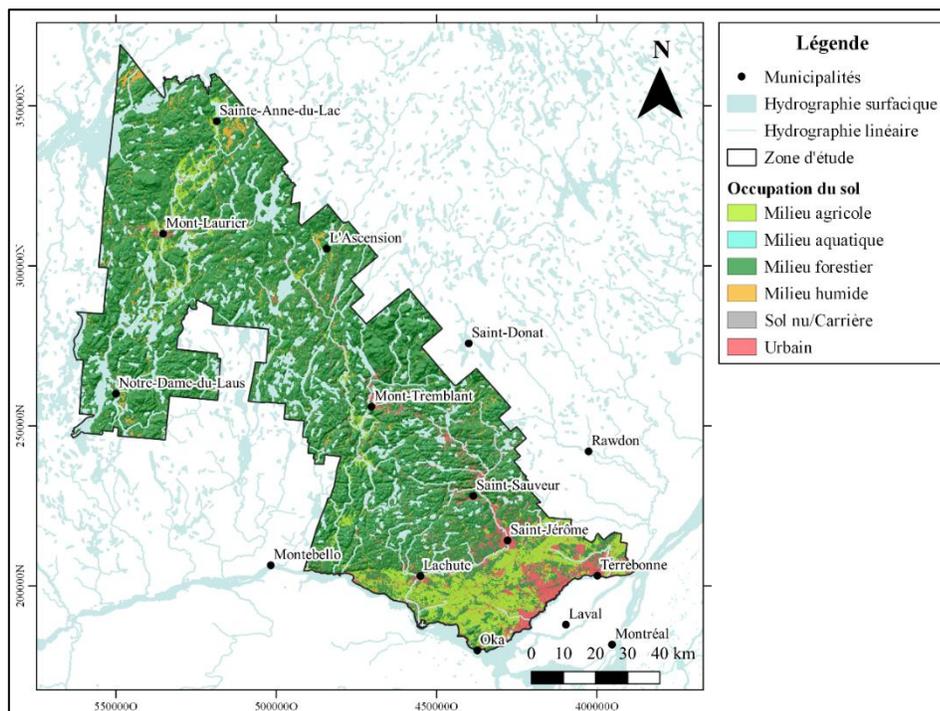


Figure 2.6 : Occupation du sol (MDDELCC, 2017b)

Dans la plus récente cartographie des milieux humides potentiels (MELCC, 2019b; Figure 2.7), les milieux humides sont classés en cinq types: eau peu profonde, marais, marécages, tourbières et milieux humides non différenciés. Ils se retrouvent dans les creux topographiques ainsi qu'aux abords des milieux hydriques. Leur densité est habituellement plus faible dans les zones urbaines et les zones agricoles. Une cartographie détaillée des milieux humides a été réalisée dans la zone au sud de Mont-Tremblant (CIC, 2016) et c'est probablement la raison pour laquelle la densité des milieux humides semble plus élevée dans la portion sud de la zone d'étude.

L'eau peu profonde, un type de milieu humide caractérisé par la présence d'eau en surface de moins de deux mètres de profondeur en période d'été, représente 18% de

la superficie des milieux humides. Elle se retrouve généralement en association avec des lacs et rivières. Les marais représentent 3% des milieux humides. Les marécages représentent 33% en superficie des milieux humides et sont dominants sur la Plate-Forme du Saint-Laurent. Sur le Bouclier canadien, ils se situent généralement en bordure des rivières. Les tourbières représentent 41% des milieux humides. Les complexes de tourbières se trouvent au nord de la zone d'étude, notamment à Sainte-Anne-du-Lac et Mont-Saint-Michel où la tourbière Décarie a une superficie de 40 km². La tourbière Notawissi, couvrant une surface de 16 km², se trouve partiellement dans la zone d'étude à Ferme-Neuve. Les milieux humides non différenciés représentent 5% des milieux humides et se retrouvent principalement dans la partie nord de la zone d'étude où aucune cartographie détaillée n'a été réalisée. Les milieux humides sur la zone d'étude ont une aire variant entre 0,14 m² et 40 km², avec une médiane de 11 752 m².

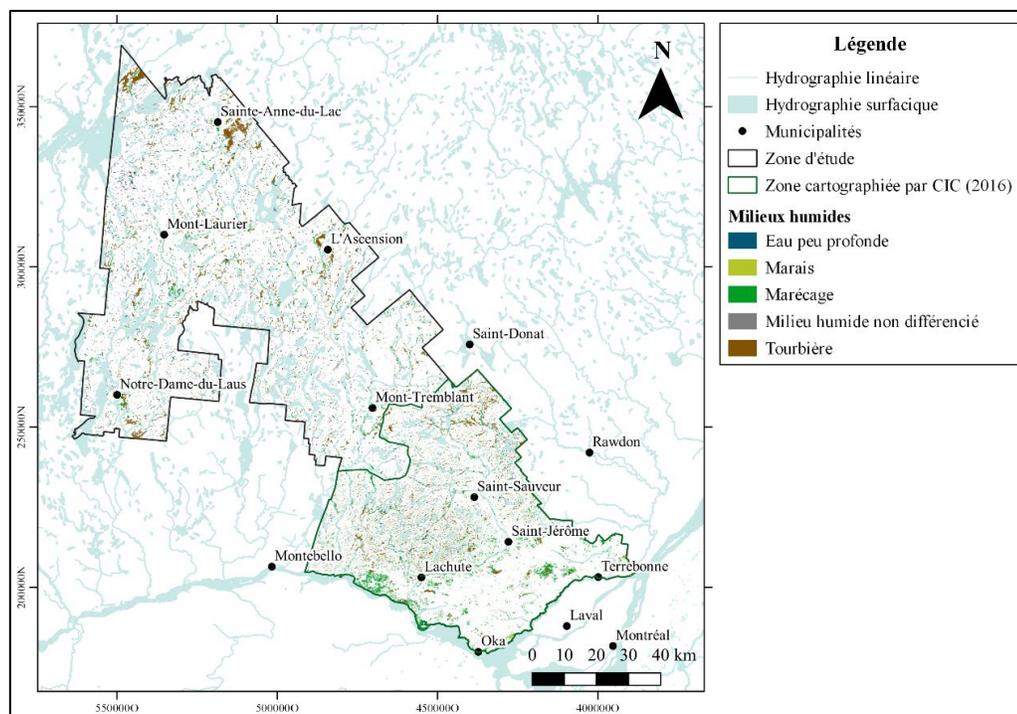


Figure 2.7 : Cartographie des milieux humides potentiels selon MELCC (2019b)

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente les deux méthodes utilisées afin d'étudier la connectivité entre l'eau souterraine et les milieux humides.

3.1 Solides totaux dissous et végétation indicatrice dans les tourbières

La première méthode utilisée pour identifier les apports d'eau souterraine aux milieux humides est une méthode de terrain développée par Larocque *et al.* (2016) pour les tourbières. Cette méthode se base sur l'observation d'indicateurs géochimiques et de végétation.

3.1.1 Description de la méthode

La méthode suggère que les solides totaux dissous (STD) dans l'eau des tourbières sont influencés par les différentes sources d'eau qui les alimentent. Une tourbière recevant de l'eau souterraine a une valeur de STD plus élevée qu'une tourbière alimentée par l'eau des précipitations puisque l'eau souterraine est généralement riche en éléments dissous. Ceux-ci proviennent de l'interaction de l'eau avec les matériaux géologiques constituant l'aquifère (Freeze et Cherry, 1979). Des valeurs limites de STD de 16 mg/L en Abitibi-Témiscamingue et de 22 mg/L dans le Centre-du-Québec ont été établies

pour distinguer les tourbières recevant des apports d'eau autres que par précipitations (Larocque *et al.*, 2016). La méthode se base sur les travaux de Ferlatte *et al.* (2015), qui ont utilisé des niveaux piézométriques pour déterminer les échanges d'eau entre douze tourbières et l'eau souterraine, et sur les travaux de Munger *et al.* (2014) qui ont utilisé des relevés de végétation et les mêmes piézomètres pour identifier les espèces végétales et les associations d'espèces végétales indicatrices d'un apport d'eau souterraine (Tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Espèces végétales et associations d'espèces indicatrices d'un apport d'eau souterraine, d'après Munger *et al.* (2014)

Espèces végétales et associations indicatrices d'un apport d'eau souterraine
<i>Carex limosa</i>
<i>Sphagnum russowii</i>
<i>Andromeda polifolia</i> var. <i>latifolia</i> et <i>Carex oligosperma</i>
<i>Chamaedaphne calyculata</i> , <i>Larix laricina</i> et <i>Sphagnum capillifolium</i>
<i>Eriophorum angustifolium</i> et <i>Sphagnum angustifolium</i>
<i>Chamaedaphne calyculata</i> et <i>Viburnum nudum</i> var. <i>cassinoides</i>

La combinaison des STD et de la végétation indicatrice permet de déterminer la possibilité d'avoir un apport d'eau souterraine (Figure 3.1). Celle-ci est élevée lorsque les STD dépassent le seuil et que la végétation indicatrice est présente. En présence d'un dépassement sans végétation indicatrice, ou à l'inverse, de végétation indicatrice sans dépassement des STD, un apport d'eau souterraine est probable. Lorsqu'il n'y a pas ni dépassement ni végétation indicatrice, la possibilité d'un apport d'eau souterraine est faible. Il est ainsi possible d'identifier les zones d'apport d'eau souterraine dans les tourbières.

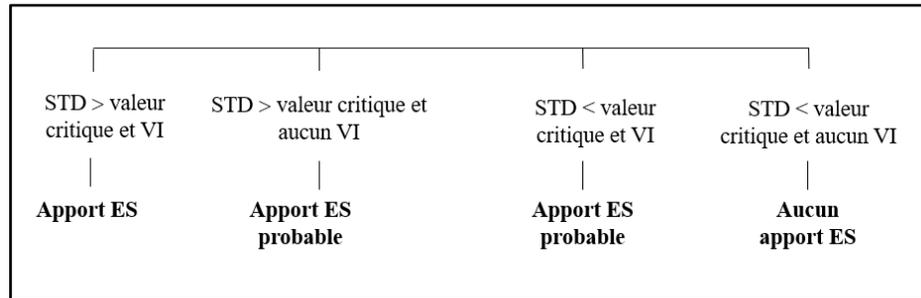


Figure 3.1 : Approche pour déterminer l'apport d'eau souterraine dans les tourbières d'après *Larocque et al. (2016)*

3.1.2 Travaux de terrain

Quarante-six tourbières ont été étudiées dans la zone d'étude entre les mois de juin et d'août 2019 et 2020 (Figure 3.2). Les journées sans précipitation ont été privilégiées pour les échantillonnages afin d'éviter l'impact que pourrait avoir les précipitations sur les différentes prises de mesure.

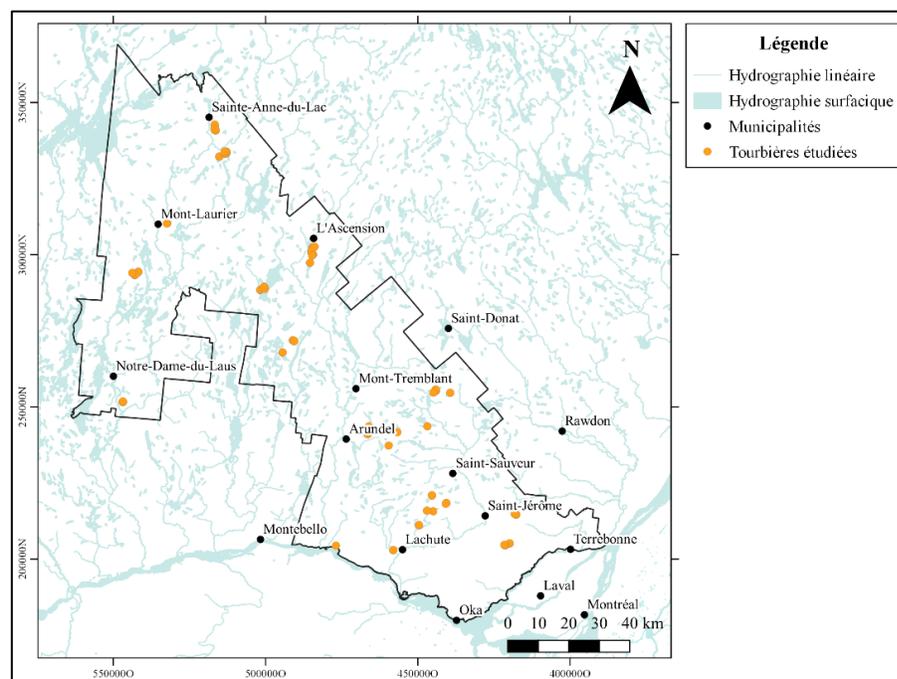


Figure 3.2 : Localisation des 46 tourbières étudiées

3.1.2.1 Sélection des tourbières

Les tourbières ont été sélectionnées en fonction de différents critères. D'abord, les tourbières de taille moyenne ont été privilégiées. L'aire des tourbières sur la zone d'étude varie entre 431 m² et 3,35 km², avec une moyenne de 24 000 m². Les tourbières déconnectées visuellement du réseau hydrographique ont été sélectionnées afin d'éviter l'influence de celui-ci sur la chimie de l'eau dans la tourbe. Elles ont aussi été choisies afin d'assurer une bonne répartition spatiale sur la zone d'étude afin de représenter le plus d'environnements hydrogéologiques possible. Les tourbières classées comme ombrotrophes selon la carte des milieux humides potentiels (MELCC, 2019b) ont été privilégiées puisque la méthode de Larocque *et al.* (2016) a été développée pour ce type de tourbière. Les tourbières entourées de sédiments du Quaternaire perméables ont été sélectionnées afin de pouvoir vérifier la présence d'une connectivité. Les tourbières avec des perturbations anthropiques évidentes ont été exclues (drainage, construction immobilière, etc.) telles qu'observées sur les images satellitaires. Le manque d'accessibilité aux tourbières dans les zones rurales a été un facteur limitant pour la sélection. Finalement, certaines tourbières ont été sélectionnées afin de répondre aux demandes des MRC. Aucune tourbière n'a été sélectionnée dans la MRC Les Moulins en raison de problèmes d'accessibilité et du faible nombre de tourbières qui s'y retrouvent.

3.1.2.2 Types de mesures et d'observations

Pour chaque tourbière, entre deux et onze stations de mesure (pour les tourbières les plus grandes) ont été étudiées. Dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, 19 stations ont été étudiées alors que dans la province de Grenville, 145 stations ont été analysées, pour un total de 164 stations. Les stations ont été réparties dans chaque tourbière afin de représenter différents contextes d'échanges potentiels avec la nappe : une station était positionnée dans le lagg, là où les échanges horizontaux avec la nappe sont les

plus probables; une autre station était positionnée au centre de la tourbière, là où les échanges sont généralement moins fréquents (Ferlatte *et al.*, 2015; Figure 3.3). Les autres stations ont été positionnées selon la présence de végétation indiquant un échange probable avec la nappe d'eau.

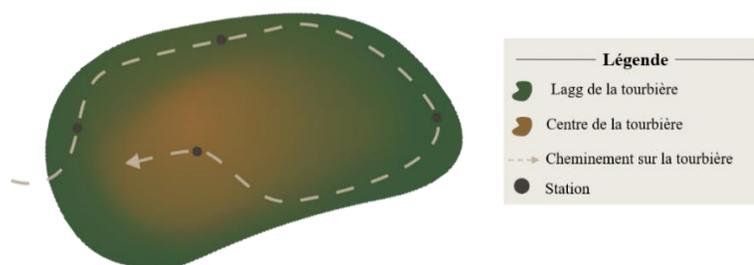


Figure 3.3 : Schéma du cheminement suivi dans les tourbières pour identifier la végétation indicatrice et de la localisation des stations lors des travaux de terrain

Les STD n'ont pas été mesurés directement sur le terrain. La conductivité électrique (CE) a plutôt été mesurée puis convertie en STD. Afin de mesurer la CE de l'eau à chaque station de la tourbière, un puits et un piézomètre ont été installés manuellement dans la tourbe de façon temporaire (Figure 3.4). Le puits est crépiné sur toute sa longueur de 1 m et le piézomètre est crépiné sur les 30 derniers cm de 60 cm afin d'éviter les effets de dilution des précipitations. Les ouvertures du puits étaient des bandes horizontales très minces, alors que celles du piézomètre étaient des ronds. Tous deux sont composés de PVC de 2,5 cm de diamètre. Les puits ont été insérés jusqu'à une profondeur de 1 m et les piézomètres jusqu'à 60 cm, comme suggéré dans l'article pour l'application de la méthode de Larocque *et al.* (2016). Le puits et le piézomètre étaient distancés d'environ 30 cm l'un de l'autre afin d'éviter des interférences potentielles entre les deux.

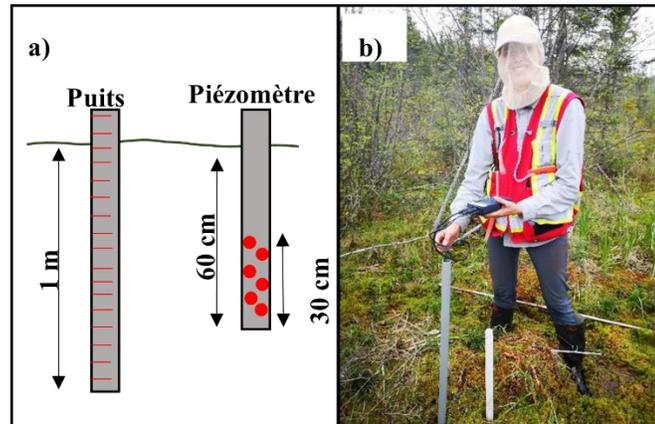


Figure 3.4 : a) Schéma du puits et du piézomètre, b) Mesure de la CE dans le puits et le piézomètre

La remontée de l'eau dans les piézomètres et puits a été étudiée avec une sonde de niveau d'eau. Après la stabilisation de l'eau dans les puits et le piézomètre, un multimètre de type WTW 3400i a été inséré dans l'eau des puits et piézomètres afin de mesurer la CE (sans purge), le pH et la température de l'eau. À chaque station, la profondeur de tourbe a été mesurée avec une tarière et le minéral sous-jacent a été identifié. La tarière n'a pas été utilisée en même temps que les mesures avec la sonde de niveau afin d'éviter de faire varier le niveau de la nappe. De plus, le piétinement sur une zone de 30 cm autour du puits et du piézomètre a été évité afin de ne pas faire varier le niveau de la nappe lors de la prise de mesure.

La présence d'espèces végétales indicatrices d'un apport d'eau souterraine a été notée sur place lors des déplacements dans la tourbière. Aucun transect n'a été suivi et aucun recensement complet de la végétation n'a été réalisé. La végétation a plutôt été cherchée sur le terrain en suivant un cheminement général dans chacune des tourbières (Figure 3.3). Une heure par tourbière a été attribuée pour l'identification de la végétation indicatrice. En absence d'identification possible de la végétation sur le terrain, des échantillons ont été prélevés et une étude plus approfondie a été réalisée en

laboratoire à l'aide d'une loupe binoculaire et d'un microscope. Pour les sphaignes, l'identification a été réalisée selon la méthode décrite par Ayotte et Rochefort (2019).

3.1.3 Analyses statistiques

Un test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été utilisé pour déterminer s'il y a une différence entre dans les épaisseurs de tourbe selon la province géologique (intervalle de confiance 95%). Le même test a également été utilisé pour déterminer s'il y a des différences statistiquement significatives d'épaisseur de tourbe selon la position dans la tourbière. Des régressions linéaires ont été réalisées afin d'identifier l'influence de la distance du bord de la tourbière et de la profondeur de la nappe maximale dans chaque tourbière sur l'épaisseur de tourbe (intervalle de confiance 95%). Les mêmes analyses ont été réalisées pour déterminer les facteurs influençant la profondeur de la nappe aux différentes stations d'échantillonnage.

Différentes analyses statistiques ont été réalisées afin d'identifier les facteurs influençant la CE. D'abord, un test non paramétrique des rangs signés de Wilcoxon a été utilisé (intervalle de confiance 95%) pour déterminer si la CE est affectée par l'utilisation du puits et du piézomètre. Différentes régressions linéaires ont été utilisées pour déterminer l'effet des précipitations, de la profondeur de la nappe, de la latitude, de la longitude et du jour julien sur la CE. L'ensemble des tests statistiques ont été réalisés avec le programme R (R Core Team, 2020).

3.1.4 Transformation de la CE en STD

3.1.4.1 Conductivité électrique

La CE est la capacité des ions dans une solution à transmettre un courant électrique (CEAEQ, 2015). Elle dépend du type d'ions dans la solution, de leur concentration, de leur valence et de leur mobilité. La mobilité des ions est dépendante de la température.

En effet, une température plus élevée diminue la viscosité du fluide et augmente par le fait même la mobilité des ions (Walton, 1989).

Afin de pouvoir comparer les valeurs de CE mesurées sur le terrain entre elles, il est nécessaire d'appliquer une correction pour enlever l'effet de la température. Cette correction permet d'obtenir des valeurs de CE à une température standard, qui est généralement de 25°C. L'équation de correction la plus simple et la plus couramment utilisée est l'équation linéaire de Sorensen et Glass (1987) qui est valable pour des températures variant entre 0°C et 30°C dans des eaux naturelles (Hayashi, 2004) :

$$EC_{T_{ref}} = \frac{EC_t}{[1+\alpha(T-T_{Ref})]} \quad (1)$$

où

α : Facteur de compensation (°C⁻¹)

EC_t : Conductivité électrique mesurée à la température T (µS/cm)

EC_{T_{Ref}} : Conductivité électrique mesurée à la température de référence (µS/cm)

T : Température à laquelle la mesure a été effectuée (°C)

T_{Ref} : Température de référence (°C)

Il n'existe pas de valeur unique du facteur de compensation (α) car il est dépendant de la réaction des ions suite à une variation de température (Walton, 1989). Puisque le type d'ions présents dans l'eau des tourbières n'est pas connu, une valeur générique de 0,0187°C⁻¹ pour les eaux naturelles ayant des températures variant entre 0°C et 30°C, déterminée par Hayashi (2004) est utilisée.

La CE de l'eau d'une tourbière dépend de plusieurs facteurs. Le facteur le plus important est la géologie locale qui a un impact sur le type d'ions présents dans l'eau. La concentration d'ions dans l'eau d'une tourbière peut augmenter lorsque le taux d'évaporation est élevé, lors de périodes de sécheresse et en présence d'un apport

d'eaux souterraines qui sont généralement riches en ions. Au contraire, la concentration d'ions diminue lors de fortes précipitations (Australia Waterwatch, 2002). Finalement, la CE dépend de différents facteurs anthropiques, comme l'apport de sel provenant du déglacage des routes ou de facteurs naturels comme les embruns marins dans les régions côtières.

3.1.4.2 Solides totaux dissous

Les STD correspondent à l'ensemble de la matière dissoute dans l'eau. Ils englobent autant les substances inorganiques qu'organiques, qu'elles soient sous forme ionique ou non. Les principaux constituants habituellement retrouvés sont les ions de calcium, magnésium, sodium, potassium, carbonate, bicarbonate, chlorure, sulfate et nitrate (CEAEQ, 2001). Il est considéré que les particules ayant un diamètre inférieur à 0,45 μm sont dissoutes (Walton, 1989). Ainsi, les STD sont l'ensemble des particules de matière organique et inorganique ayant un diamètre inférieur à 0,45 μm dans l'eau.

Afin de mesurer la concentration en STD, des analyses chimiques en laboratoire doivent être effectuées. Au Québec, la méthode gravimétrique est utilisée. L'échantillon est d'abord pesé, ensuite filtré et évaporé. Finalement, il est séché à 105°C puis pesé à nouveau. La différence de masse équivaut à la quantité de STD (CEAEQ, 2001). Ces analyses doivent absolument être faites dans un laboratoire accrédité, ce qui nécessite beaucoup de temps et d'argent. De plus, l'échantillonnage sur le terrain nécessite du matériel particulier, ainsi que de prendre des précautions afin d'éviter de la contamination ou des réactions chimiques indésirables entre le prélèvement et l'analyse (Walton, 1989).

Les STD peuvent également être estimés comme étant la somme des ions présents dans l'eau. Les cations les plus importants sont généralement Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ alors que les anions principaux sont Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , et NO_3^- (Thirumalini et Joseph,

2009). L'équation suivante est généralement utilisée pour calculer les STD (Rice *et al.*, 2012):

$$STD = 0,6 * alcalinité + Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Cl^- + SO_4^{2-} + SiO_3^{2-} + NO_3^- + F^- \quad (2)$$

3.1.4.3 Conversion

La CE peut être mesurée plus facilement sur le terrain que les STD. Pour cette raison, les STD sont plutôt évalués à partir de la CE qui comme pour les STD, varie en fonction des ions présents dans l'eau. Toutefois, les STD incluent des substances non ioniques qui ne sont pas mesurées par la CE et la mesure de la CE inclut les suspensions colloïdales (McNeil et Cox, 2000). La relation entre les deux n'est pas linéaire et dépend fortement de la composition et de la force ioniques (Hayashi, 2004). Ainsi, il n'existe aucune équation universelle permettant de représenter la relation entre la CE et les STD (Walton, 1989; Rusydi, 2018). La relation mathématique la plus simple et la plus souvent utilisée entre la CE et les STD est :

$$STD = k * CE \quad (3)$$

où

k : Facteur de conversion

STD : Solides totaux dissous (mg/l)

CE: Conductivité électrique à 25°C (μS /cm)

Trois facteurs de conversion différents ont été testés pour transformer la CE en STD. D'abord, la littérature propose un facteur entre 0,5 et 0,9 (Walton, 1989), et une valeur de 0,65 pour les eaux douces (Thirumalini et Joseph, 2009; Rusydi, 2018). Dans un deuxième temps, le facteur de conversion de l'eau souterraine voisine a été utilisé. Dans le cadre du projet PACES Laurentides et MRC Les Moulins, des analyses chimiques et des mesures de la CE sur des échantillons d'eau souterraine ont permis d'estimer ce facteur de conversion à 0,76. Le troisième facteur testé est celui déterminé au cours

d'une étude réalisée dans des tourbières en Abitibi et dans le Centre-du-Québec (Ferlatte, 2014), qui a une valeur moyenne de 0,41. Finalement, la CE correspondant à la valeur limite de STD de 22 mg/L identifiée comme indicatrice d'apport d'eau souterraine dans les tourbières du Centre-du-Québec par Larocque *et al.*, (2016) (sur la base de l'étude de Ferlatte, 2014) a été déterminée et correspond à une valeur de 55 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette valeur est utilisée pour identifier les connexions à l'eau souterraine sans utiliser un facteur de conversion.

3.2 Identification cartographique de la connectivité hydrogéologique

La deuxième méthode utilisée pour identifier les connexions aquifère – milieu humide est une approche d'analyse spatiale permettant d'évaluer l'hydrodiversité des milieux humides, soit la diversité de leurs fonctions hydrologiques, selon leur position dans le réseau hydrographique et leur connectivité avec les sédiments avoisinants. La méthode est largement inspirée de celle proposée par Rosa *et al.* (2018) pour les tourbières de l'Abitibi, mais modifiée dans le but d'inclure l'ensemble des milieux humides de la région d'étude.

3.2.1 Étapes méthodologiques

Le premier critère établi par Rosa *et al.* (2018) pour caractériser l'hydrodiversité des milieux humides est un critère géologique. Pour l'évaluer, il est nécessaire d'étudier les contacts entre les milieux humides et les formations géologiques voisines afin de déterminer la possibilité de connexion avec l'eau souterraine. Pour ce faire, les formations géologiques superficielles sont divisées en trois groupes d'unités hydrogéologiques selon leur connectivité potentielle aux aquifères (Tableau 3.2). Le premier groupe inclut le roc et les dépôts de till, très présents dans la région d'étude. Dans les Laurentides, la matrice silto-sableuse à silto-argileuse du till a été délavée par les eaux de fontes et l'action des vagues de la mer sous la limite marine (Randour *et*

al., 2018). Lorsque ce till remanié est peu épais, il est directement en contact hydraulique avec le roc fracturé et érodé en surface. Le till de fond, plus épais et compact, est généralement moins connecté avec le roc puisque seule sa portion sommitale a été remaniée. Le deuxième groupe inclut tous les dépôts de surface sableux et graveleux associés aux eskers et moraines qui forment des aquifères en surface. Ils comprennent les dépôts fluvioglaciaires, littoraux, éoliens, deltaïques ainsi que les alluvions. Le dernier groupe est formé des sédiments silteux à argileux ayant une conductivité hydraulique plus faible. Ils englobent les sédiments fins d'eau profonde, les sédiments glaciomarins d'eau profonde et les dépôts de glissement de terrain. Afin de quantifier le critère géologique, la longueur du périmètre partagée entre le milieu humide et chaque groupe est mesurée et les valeurs sont normalisées par rapport au périmètre total de chaque milieu humide.

Tableau 3.2 : Dépôts de surface associés aux catégories du premier critère dans la méthode de Rosa *et al.* (2018)

Catégories de dépôts	Dépôts de surface
Roc et till	Tc, Tm, Tr, R, Rs, Rm, Rd et Ri
Argile et silt	Cg, LGa et MGa
Sable et gravier	Ap, At, Ax, Ed, Go, Gs, Gx, Gxt, L, Lb, Ld, LGb, LGd, MGb, MGd

Le deuxième critère établi par Rosa *et al.* (2018) est un critère hydrologique. Pour l'évaluer, il est nécessaire d'établir les contacts entre les milieux humides et l'eau de surface et évaluer les possibilités d'interactions entre les deux systèmes. Trois types de connexion avec le réseau hydrographique sont définis. Le premier type de connexion inclut les cours d'eau qui commencent dans les milieux humides et les lacs associés à ces cours d'eau. Le deuxième inclut les cours d'eau qui passent dans les milieux humides et les lacs qui y sont associés. Le troisième inclut les lacs et rivières qui

partagent une portion du périmètre avec les milieux humides. Pour évaluer les contacts, la longueur des cours d'eau est mesurée puis doublée pour tenir compte des deux rives et le périmètre des lacs est mesuré. Pour les lacs et rivières touchant à la bordure des milieux humides, la portion du périmètre partagé est mesurée. Pour chaque milieu humide, la somme des longueurs est faite et chaque catégorie est normalisée selon cette valeur. Les connexions avec l'eau de surface et l'eau souterraine sont représentées dans des diagrammes trilinéaires. Lorsque plusieurs milieux humides sont présents dans une zone restreinte, ils sont analysés sous forme de complexes, i.e. en groupe de milieux humides interconnectés, plutôt que de manière individuelle, afin de faciliter leur identification et l'analyse.

L'élévation médiane de chaque complexe de milieux humides est ensuite extraite du modèle numérique de terrain (MFFP, 2020). L'élévation médiane est aussi utilisée pour diviser les milieux humides en quatre groupes d'élévation contenant chacun 25% des données. Ceci permet d'analyser les différences de connexion selon l'élévation. De plus, une variable correspondant à l'accumulation de flux a été calculée pour chacun des milieux humides. L'accumulation de flux est calculée sur ArcGIS en sommant le nombre de cellules qui s'écoule vers une autre cellule en fonction de la pente. Plus la valeur dans une cellule est élevée, plus elle reçoit d'eau d'un grand territoire. L'accumulation de flux traduit ainsi indirectement l'aire de drainage qui alimente le milieu humide. Un test de Kruskal-Wallis est réalisé pour identifier les différences statistiquement significatives entre les groupes de milieux humides qui sont connectés à différentes catégories de géologie et à différents types de connexion au réseau hydrographique en fonction de leur accumulation de flux. Le test est suivi d'une comparaison par paires pour déterminer les groupes où les différences sont présentes. Ces tests statistiques sont réalisés avec le programme R (R Core Team, 2020).

L'hydrodiversité de l'ensemble des milieux humides est illustrée à l'aide de diagrammes triangulaires. Finalement, la méthode est répétée, mais pour les tourbières étudiées à l'aide de la première méthode.

3.2.2 Données nécessaires

Afin de réaliser l'analyse spatiale, différentes données sont nécessaires (Tableau 3.3) : la carte des dépôts de surface, l'hydrographie linéaire, l'hydrographie surfacique, l'hydrographie de jonction (i.e. les points limites des différents cours d'eau), la carte des milieux humides et le modèle numérique de terrain.

Tableau 3.3 : Données nécessaires et sources utilisées pour l'analyse spatiale décrite par Rosa *et al.* (2018)

Données nécessaires	Sources
Dépôts de surface	Géologie du Quaternaire (MERN, 2020b)
Hydrographie surfacique	GRHQ (MERN, 2020a)
Hydrographie linéaire	GRHQ (MERN, 2020a)
Hydrographie de jonction	GRHQ (MERN, 2020a)
Milieux humides	Milieux humides potentiels (MELCC, 2019b)
Modèle numérique de terrain	LiDAR (MFFP, 2020)

3.2.3 Travaux de terrain

Au cours des étés 2019 et 2020, 81 milieux humides, dont 46 tourbières, 27 marais et huit marécages ont été visités (Figure 3.5). Les milieux humides ont été sélectionnés en fonction de leur accessibilité, de leur répartition sur le territoire, de leur taille, des dépôts de surface environnants, des recommandations des MRC et de leur niveau de perturbation.

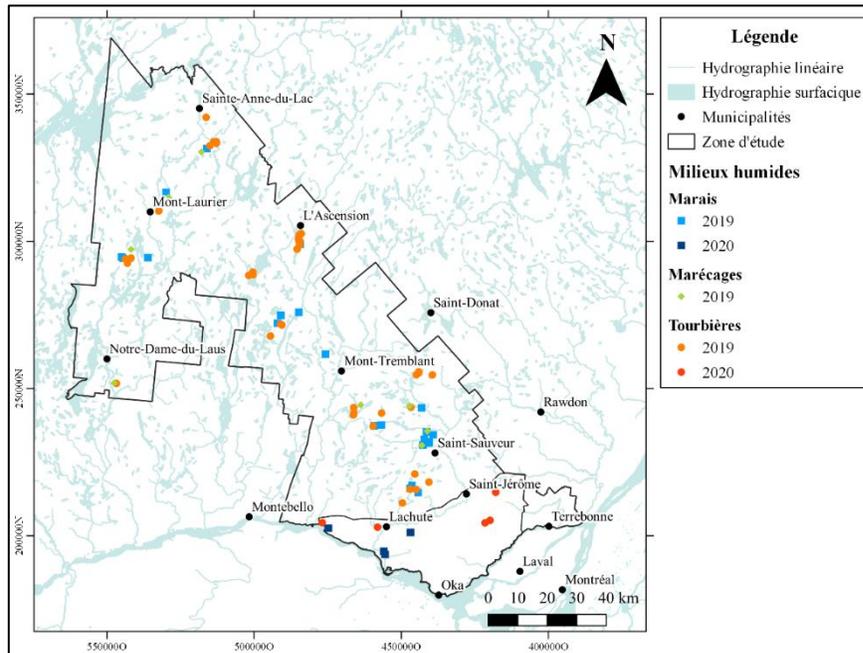


Figure 3.5 : Milieux humides étudiés pour la comparaison avec la méthode cartographique

Le but des travaux de terrain était d'avoir une base avec laquelle comparer les résultats de l'analyse spatiale. Pour ce faire, le contexte géomorphologique, les sédiments de surface, la connectivité au réseau hydrographique et les autres apports d'eau potentiels ont été évalués qualitativement *in situ*. Avec la tarière, des sédiments ont été prélevés et leur nature a été évaluée visuellement sur le terrain.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Ce chapitre présente d'abord les résultats de la première méthode, i.e. l'épaisseur de tourbe, le type de sédiments sous-jacents, la végétation indicatrice observée, la conductivité électrique mesurée et l'évaluation de la connectivité à l'eau souterraine. La deuxième partie du chapitre présente les résultats de la deuxième méthode, i.e. la connectivité aux dépôts meubles et au réseau hydrographique, ainsi que les observations de terrain.

4.1 Description des tourbières étudiées

La superficie moyenne des tourbières étudiées dans la province de Grenville est de 0,31 km² alors que dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, elle est de 0,12 km². L'épaisseur maximale de tourbe mesurée aux différentes stations dans la province de Grenville varie de 41 à 480 cm (médiane 228 cm, Figure 4.1). Il est important de souligner que 480 cm correspond à la longueur maximale de la tarière et qu'une épaisseur de tourbe de plus de 480 cm a été observée 37 fois, dans 20 tourbières différentes. Dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, l'épaisseur maximale de tourbe varie de 59 à 207 cm (médiane 96 cm). L'épaisseur maximale de tourbe de la province de Grenville et celles des Basses-Terres du Saint-Laurent appartiennent à des populations statistiquement différentes (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,05$, $W = 308$; Figure A.1).

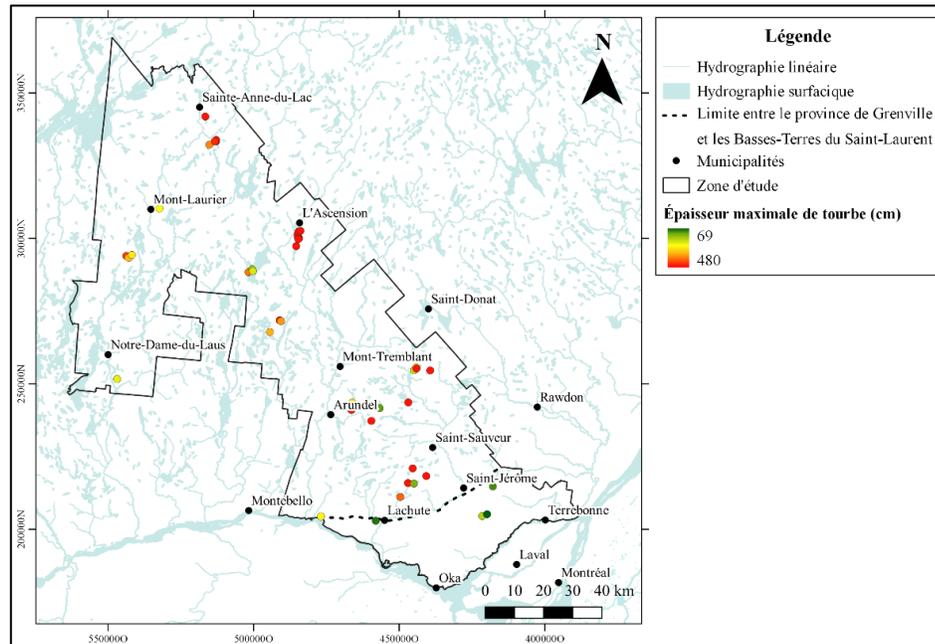


Figure 4.1 : Épaisseur maximale de tourbe dans toutes les tourbières étudiées

L'épaisseur de tourbe sur les bords des tourbières varie de 41 à 480 cm (médiane 156 cm) et de 65 cm à 480 cm au centre de la tourbière, dans la partie la plus élevée (médiane 267 cm; Figure A.2). Le « centre de la tourbière » correspond à la partie la plus élevée de la zone ombrotrophe tandis que le « bord de la tourbière » correspond de manière non quantifiée à la partie minerotrophe de la tourbière (lagg). Les épaisseurs de tourbe à ces deux positions sont statistiquement différentes (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,05$, $W = 2171$).

D'autres facteurs pouvant expliquer la variation de l'épaisseur de tourbe ont été recherchés, soit la distance du bord des tourbières (Figure A.3a) et la profondeur maximale de la nappe dans la tourbe (Figure A.3b). L'épaisseur de tourbe augmente avec la distance du bord de la tourbière puisque sa régression linéaire est statistiquement significative ($p < 0,05$), mais son coefficient de détermination est très

bas, ce qui suggère que la relation est presque inexistante. Aucune relation statistiquement significative n'est visible entre l'épaisseur maximale de tourbe et la profondeur maximale de la nappe.

Le matériau géologique sous-jacent aux dépôts tourbeux le plus fréquemment rencontré est le sable (80 stations) et le moins fréquent est le gravier (trois stations) (Tableau 4.1). L'argile a été identifiée huit fois, le silt 14 fois, alors que les refus sur bloc ou roc ont été observés 20 fois. La nature des matériaux géologiques sous-jacents n'est pas disponible lorsque l'épaisseur de tourbe dépassait la longueur de la tarière (37 stations) ou que le prélèvement d'échantillon était impossible (deux stations).

Tableau 4.1 : Nombre d'observations des différents matériaux géologiques sous-jacents aux tourbières.

Type de sédiments	Nombre d'observations
Argile	8
Gravier	3
Refus sur bloc ou roc	20
Sable	80
Silt	14
Aucune donnée	39

Afin de représenter les sédiments spatialement, les tourbières ont été regroupées selon leur proximité aux villes principales (Figure 4.2). Dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, du sable a été observé sous les cinq tourbières visitées. Le sable est également dominant sous les tourbières dans la province de Grenville. L'argile a principalement été observée près de Saint-Anne-du-Lac, au nord de Mont-Tremblant et à l'Ascension. Les refus sur roc ou sur bloc se trouvent surtout à Arundel et près de Mont-Laurier. L'absence de données causée par une profondeur de tourbe supérieure à 480 cm a été observée majoritairement dans les tourbières au nord de Saint-Sauveur, à Lachute et près de l'Ascension. Le gravier a été observé dans une tourbière près de Saint-Sauveur.

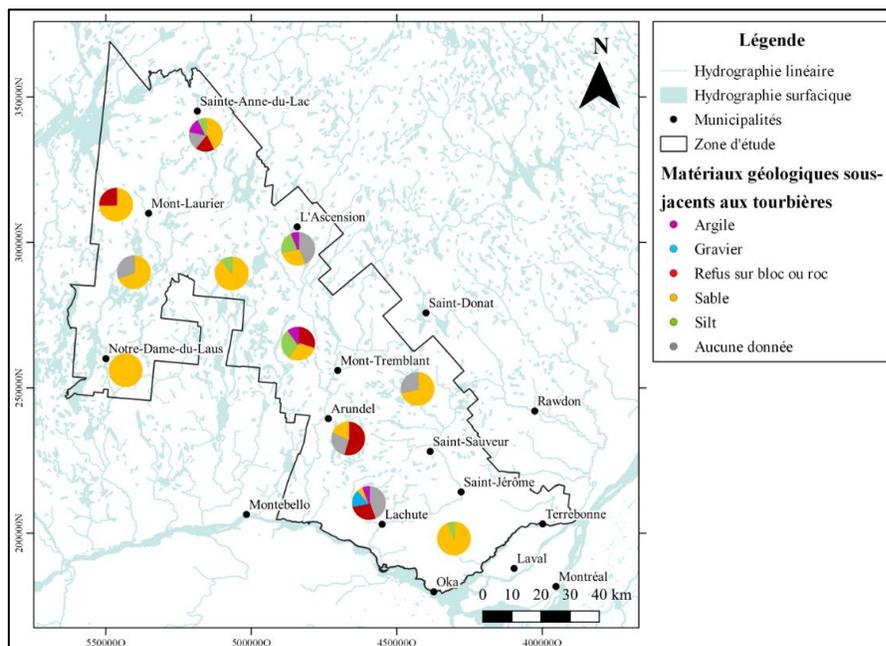


Figure 4.2 : Matériaux géologiques sous-jacents aux tourbières. Les tourbières sont regroupées selon leur proximité

La profondeur de la nappe à toutes les stations d'échantillonnage varie de 0 à 100,0 cm (médiane 9,6 cm) dans la province de Grenville et de 0 à 37,3 cm dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (médiane 13,5 cm; Figure B.1). Pour cette variable, les tourbières du Grenville ne sont pas statistiquement différentes de celles des Basses-Terres du Saint-Laurent (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p > 0,05$, $W = 1141$). La profondeur de 100,0 cm est un peu étonnante, mais correspond à une tourbière perturbée par des activités humaines, soit la présence d'une route dans la tourbière et d'activités de drainage qui y sont probablement associées. Cette tourbière a été étudiée malgré la présence de perturbation puisqu'elle se trouvait dans une région où le choix de tourbières était limité.

La profondeur de la nappe varie de 0 à 81,4 cm (médiane 10,2 cm) sur les bords des tourbières et de 0 cm à 100,0 cm au centre des tourbières où la tourbe est la plus épaisse (médiane 9,6 cm; Figure B.2). Les profondeurs de nappe ne sont pas statistiquement différentes aux deux endroits dans les tourbières (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p > 0,05$, $W = 1860$). Les relations entre la profondeur de la nappe et la distance du bord (Figure B.3), mais ce facteur ne semble pas expliquer ses variations ($p > 0,05$).

Les espèces végétales et associations d'espèces végétales indicatrices d'un apport d'eau souterraine ont été observées 44 fois sur le terrain (Tableau 4.2), sur un total de 164 points d'observation (27% des stations). Les espèces végétales indicatrices seules ont été observées plus fréquemment que les associations d'espèces végétales indicatrices.

Tableau 4.2 : Nombre d'observations d'espèces végétales indicatrices d'un apport d'eau souterraine

Espèces végétales et associations indicatrices d'un apport d'eau souterraine	Nombre d'observations
<i>Carex limosa</i>	8
<i>Sphagnum russowii</i>	12
<i>Andromeda polifolia</i> var. <i>latifolia</i> et <i>Carex oligosperma</i>	13
<i>Chamaedaphne calyculata</i> , <i>Larix laricina</i> et <i>Sphagnum capillifolium</i>	4
<i>Eriophorum angustifolium</i> et <i>sphagnum angustifolium</i>	1
<i>Chamaedaphne calyculata</i> et <i>Viburnum nudum</i> var. <i>cassinoides</i>	6

La végétation indicatrice a été observée dans 24 tourbières sur un total de 46 (Figure 4.3). Celles-ci sont réparties de façon plutôt uniforme sur l'ensemble de la zone d'étude. Il est important de souligner qu'une absence d'observation n'indique pas une absence de végétation indicatrice. En effet, aucun recensement complet de la végétation n'a été fait sur les tourbières et elles ont été parcourues à la recherche de ces espèces indicatrices. Il est donc possible que la végétation indicatrice n'ait pas été observée, mais qu'elle soit tout de même présente.

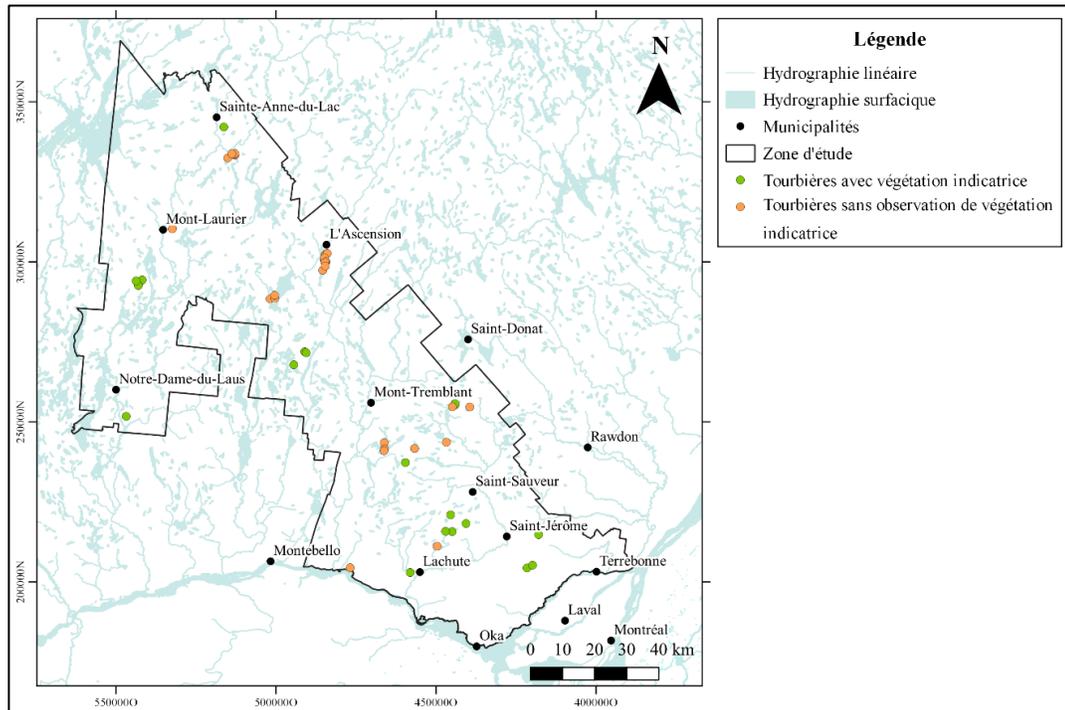


Figure 4.3 : Répartition des tourbières avec végétation indicatrice d'un apport d'eau souterraine

La végétation indicatrice a été observée 13 fois dans les Basses-Terres du Saint-Laurent et 31 fois dans la province de Grenville (Figure C.1a). La plus grande variété d'espèces indicatrices a pu être observée en présence de dépôts sableux (Figure C.1b). Aucune espèce n'a été observée en présence de dépôts graveleux. La végétation indicatrice a été observée 28 fois en bordure des tourbières et 16 fois au centre des tourbières (Figure C.1c).

4.2 Conductivité électrique et solides totaux dissous

La CE a été mesurée à 164 stations réparties sur les 46 tourbières. En moyenne, chaque tourbière avait quatre stations : trois dans le lagg et une au centre. Pour 115 des stations,

la CE a été mesurée à la fois dans les puits et dans les piézomètres, tandis que pour les 49 autres stations, la CE a été mesurée seulement dans le puits ou seulement dans le piézomètre. En présence de tourbe d'épaisseur < 1 m, il n'était pas possible d'insérer le puits puisque celui-ci était crépiné sur 1 m. De plus, en présence de tourbe très décomposée, la crépine du puits se remplissait parfois, ce qui empêchait l'eau de pénétrer et empêchait la mesure de la CE. En outre, l'absence de pointe au bas du piézomètre rendait l'insertion dans la tourbe difficile en présence de racines.

La CE des piézomètres varie de 11 à 361 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (médiane 55 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et celle des puits varie de 2 à 416 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (médiane 42 $\mu\text{S}/\text{cm}$; Figure D.1). En considérant seulement les stations où des mesures sont disponibles à la fois au piézomètre et au puits, les CE mesurées dans les deux types d'installation sont statistiquement différentes (test Wilcoxon-Mann-Whitney, $p < 0,05$, $W = 1128,5$). Considérant que la méthode utilisée par Larocque *et al.* (2016) est basée sur l'utilisation d'un piézomètre, seules les valeurs de CE mesurées dans les piézomètres seront utilisées pour la suite de l'analyse.

Les CE dans la province de Grenville et dans les Basses-Terres du Saint-Laurent ont été comparées (Figure D.2). La CE dans la province de Grenville a été mesurée à 145 stations dans les piézomètres et varie entre 11 et 237 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (médiane de 54 $\mu\text{S}/\text{cm}$), tandis que celle dans les Basses-Terres du Saint-Laurent a été mesurées à 19 stations et varie entre 18 et 361 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (médiane de 67 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les deux populations sont statistiquement différentes (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,05$, $W = 1803$)

D'autres facteurs explicatifs de la CE ont été recherchés, soient la profondeur de la nappe (Figure D.3a), le jour de l'échantillonnage (Figure D.3b), la latitude (Figure D.3c), la longitude (Figure D.3d), la présence de précipitations le jour de l'échantillonnage (Figure D.3e) ou la veille de l'échantillonnage (Figure D.3f). Les régressions linéaires sont statistiquement significatives ($p < 0,05$) pour le jour julien, la latitude, la longitude et les précipitations du jour-même. Toutefois, leurs coefficients

de détermination sont très bas, ce qui suggère des relations faibles ou négligeables. Les régressions ne sont pas significatives pour la profondeur de la nappe et les précipitations du jour précédent ($p > 0,05$).

4.3 Connectivité des tourbières à l'eau souterraine évaluée avec la méthode STD-végétation

La méthode proposée par Larocque *et al.* (2016) suggère d'utiliser un seuil de STD de 22 mg/L dans le Centre-du-Québec et un seuil de STD de 16 mg/L en Abitibi-Témiscamingue comme un des deux critères pour distinguer les tourbières qui reçoivent de l'eau souterraine de celles qui n'en reçoivent pas. Ce seuil est ensuite combiné avec la présence ou non d'espèces végétales indicatrices d'un apport d'eau souterraine pour identifier les tourbières connectées à la nappe. Il n'existe pas de seuil de STD correspondant à la géologie de la zone d'étude. La connectivité des tourbières étudiées avec l'eau souterraine a été évaluée avec le seuil le plus élevé de 22 mg/L puisqu'il s'agit de la valeur la plus limitante pour la connexion. L'utilisation d'un seuil de 16 mg/L aurait mené à un plus grand nombre de tourbières avec un apport d'eau souterraine.

Les CE ont été converties en STD à l'aide des trois facteurs mentionnés précédemment. Les résultats montrent que plus le facteur de conversion est élevé, plus le nombre de stations où il y a apport d'eau souterraine grand (Tableau 4.3). Le nombre de stations où un apport d'eau souterraine est confirmé est deux fois plus grand avec un facteur de 0,65 ou 0,76 comparativement à un facteur de 0,41. Le nombre de stations avec des apports limités est de 5, 10 et 55 lorsque le facteur diminue de 0,76 à 0,65 et à 0,41. L'utilisation d'une valeur limite de 55 $\mu\text{S}/\text{cm}$ donne le même nombre de stations avec apport d'eau souterraine confirmé et presque le même nombre de stations avec apport d'eau souterraine limité qu'un facteur de 0,41.

Tableau 4.3 : Nombre de stations correspondant à des apports d'eau souterraine confirmés, potentiels et limités pour différents facteurs de conversion ou CE seuil

Facteur de conversion / CE seuil	Nombre de stations où les apports d'eau souterraine sont confirmés	Nombre de stations où des apports d'eau souterraine potentiels sont identifiés	Nombre de stations où les apports d'eau souterraine sont limités
0,41	17	92	55
0,65	35	119	10
0,76	38	121	5
55 μ S/cm	17	88	59

Les apports d'eau souterraine potentiels se produisent lorsque seulement un des deux indicateurs, i.e. la végétation ou les STD excédant le seuil, est identifié. Pour tous les facteurs de conversion, le nombre stations où la végétation indicatrice est présente et que les STD sont inférieurs au seuil est toujours plus petit que le nombre de fois où les STD dépassent le seuil et que la végétation est absente (Tableau 4.4). Pour les facteurs de 0,65 et 0,76, le nombre de fois où la végétation indicatrice est présente est très faible comparativement au facteur de 0,41 et à la valeur limite de 55 μ S/cm.

Tableau 4.4 : Nombre de fois où la végétation est présente, mais que les STD ne dépassent pas la valeur critique et nombre fois où les STD dépassent la valeur critique, mais que la végétation indicatrice est absente pour chacun des facteurs de conversion et CE seuil

Facteur de conversion / CE seuil	Nombre d'apports d'eau souterraine potentiel	Nombre de fois où la végétation indicatrice est présente	Nombre de fois où la STD dépasse le seuil
0,41	92	24	68
0,65	119	6	113
0,76	121	3	118
55 (μ S/cm)	88	24	64

4.4 Classement des milieux humides selon leur élévation médiane

L'altitude médiane a été calculée pour tous les milieux humides et la population a été divisée en quatre classes contenant chacune 5735 ou 5737 milieux humides : entre 6 et 200 m, entre 200 et 276 m, entre 276 et 347 m et entre 347 et 730 m (Tableau 4.5). Il y a peu de milieux humides à de faibles élévations, ce qui reflète l'urbanisation présente dans le sud de la zone d'étude. Les milieux humides de forte élévation sont également peu nombreux, ce qui concorde avec l'emplacement habituel des milieux humides dans des dépressions plutôt qu'en sommet de montagnes.

Tableau 4.5 : Catégories d'élévation qui permettent de diviser les milieux humides en quatre classes égales

Catégories d'élévation moyenne (m)	Nombre de complexes de milieux humides
6 à 200	5735
200 à 276	5737
276 à 347	5735
347 à 730	5737

4.5 Position des milieux humides dans les dépôts meubles

À toutes les élévations, les milieux humides sont le plus souvent en contact avec le roc et le till (RT) et le moins souvent en contact avec les dépôts argileux et silteux (ASi; Figure E.1). Plus l'élévation augmente, moins les milieux humides touchent aux dépôts d'argile et de silt et de sable et gravier (SaG). Ceci concorde avec la répartition des dépôts meubles dans la région, soit que les dépôts argileux et sableux se trouvent dans les fonds de vallée, i.e. aux altitudes les plus basses, et que le roc se trouve sur le sommet des collines, i.e. aux altitudes les plus élevées.

Le nombre de milieux humides en contact avec le roc et le till est le plus élevé (13 766) et les conditions les moins fréquemment rencontrées sont les milieux humides touchant aux trois types de dépôts (28; Tableau E.1). Les superficies médianes varient de 0,0002 km² pour les milieux humides déconnectés des dépôts meubles (Tableau E.1, ligne h) à 0,07 km² pour les milieux humides touchant aux trois types de dépôts. L'élévation médiane est la plus basse pour les milieux humides touchant aux dépôts argileux et silteux (66 m), tandis qu'elle est maximale pour le till et le roc (302 m). L'étendue médiane de l'élévation varie entre 1 m pour les milieux humides isolés des dépôts meubles et 11 m pour les milieux humides touchant aux trois types de dépôts. Finalement, l'accumulation de flux médiane varie entre 8 et 12.

Afin de comparer l'accumulation de flux, les milieux humides ont été classés en catégories selon la prédominance de leur connexion aux dépôts meubles. Les milieux humides dont plus de 50% du périmètre touche à l'argile et au silt ont été classés dans la catégorie « ASi », ceux partageant plus de 50% de leur périmètre avec le roc et les dépôts de till ont été classés comme « RT », et ceux dont le périmètre touche à plus de 50% de sable et gravier ont été classés comme « SaG ». Les résultats montrent que l'accumulation de flux médiane est la plus grande pour les milieux humides de la catégorie ASi, qu'elle est intermédiaire pour les milieux humides SaG et qu'elle est la plus petite pour les milieux humides RT.

Le test de Kruskal-Wallis suggère qu'il y a une différence significative entre toutes les différentes paires à un intervalle de confiance de 95% ($P < 2,2 \times 10^{-16}$, $\chi^2 = 90,386$). Les milieux humides associés aux dépôts de sable et gravier (SaG) ont une plus petite accumulation de flux médiane que ceux associés aux dépôts argileux (ASi) et au roc et till (RT), ce qui suggère que leur aire de drainage est la plus petite (Figure E.2). Les milieux humides associés au roc et dépôts de till (RT) ont une accumulation de flux légèrement supérieure à celles des milieux humides ASi et SaG. Ceci suggère que leur aire de drainage est plus grande que celle des milieux humides SaG et inférieure à celle

des milieux humides ASi. Finalement, les milieux humides ASi ont l'accumulation de flux la plus élevée, ce qui suggère qu'ils ont de plus grandes aires de drainage que les milieux humides SaG et RT.

4.6 Position des milieux humides dans le réseau hydrographique

La majorité des connexions au réseau hydrographique, à toutes les élévations, sont celles de type passant (P; Figure F.1). Plus l'élévation augmente, plus la connexion avec les cours d'eau sortant (S) augmente. Les milieux humides bordés par des lacs et rivières (LR) sont plus nombreux lorsque l'élévation varie entre 200 et 276 m. À toutes les élévations, les milieux humides voisins de lacs et rivières et les milieux humides donnant naissance à des cours d'eau sont en nombres similaires. De plus, pour les élévations les plus basses (6 à 200 m), le pourcentage de milieux humides qui ne sont pas connectés à un cours d'eau passant, qui n'alimentent pas un cours d'eau et qui ne sont pas bordés par un lac ou une rivière est le plus élevé (60%). Ce pourcentage est similaire pour les classes d'élévations plus élevées (entre 30 à 34%).

Au total, 14 204 complexes de milieux humides sont connectés au réseau hydrographique, ce qui représente 62% des milieux humides sur la zone d'étude (Tableau F.1). Le nombre de milieux humides déconnectés du réseau hydrographique est élevé, avec une valeur de 8 736 (38%). Le nombre de complexes de milieux humides connectés au réseau hydrographique par des cours d'eau passant est le plus élevé des trois catégories (9 451), tandis qu'il est similaire pour les milieux humides connectés aux lacs et rivières (1 303) et les milieux humides qui donnent naissance à un cours d'eau (1 328). Les superficies médianes varient entre 0,001 km² pour les milieux humides reliés au réseau hydrographique par des lacs et rivières et des cours d'eau débutants, et 0,07 km² pour les milieux humides connectés au réseau hydrographique par les trois catégories. L'élévation médiane est minimale pour les milieux humides déconnectés du réseau hydrographique (246 m; Tableau F.1, ligne h)

et elle est maximale pour les milieux humides connectés au réseau hydrographique par des cours d'eau passant et lacs et rivières (301 m). L'élévation des milieux humides dans lequel un cours d'eau commence est la deuxième plus élevée avec une valeur de 300 m. L'étendue médiane de l'élévation varie entre 3 m pour les milieux humides déconnectés du réseau hydrographique et 9 m pour les milieux humides connectés au réseau hydrographique par des cours d'eau commençant et passant. L'accumulation de flux est minimale pour les milieux humides connectés au réseau hydrographique par des cours d'eau commençant et par des lacs et rivières (5) et est maximale pour les cours d'eau passant (11).

Afin de comparer l'accumulation de flux, les milieux humides ont été classés en catégories selon la prédominance de leur connexion au réseau hydrographique. Les milieux humides dans lesquels plus de 50% de la connexion au réseau hydrographique provient des cours d'eau commençant et sortant de ceux-ci sont dans la catégorie « S ». Les milieux humides qui ont une connexion de plus de 50% avec les cours d'eau passant se retrouvent dans la catégorie « P ». Les milieux humides dont les lacs et rivières en bordure représentent plus de 50% de la connexion au réseau hydrographique sont classés dans la catégorie « LR ». Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il y a une différence significative entre les différents groupes à un intervalle de confiance de 95% ($P < 2,2 \times 10^{-16}$, $\chi^2 = 545,85$). Les milieux humides connectés au réseau hydrographique par des cours d'eau passant (P) ont la plus grande accumulation de flux (Figure F.2). Ceci suggère qu'ils drainent une plus grande surface. Les milieux humides connectés au réseau hydrographique par des lacs et rivières (LR) ont la plus petite accumulation de flux, ce qui suggère qu'ils drainent une plus petite surface. Finalement, les milieux humides dans lesquels un cours d'eau commence et sort (S) ont une accumulation de flux moyenne. Leur aire de drainage se trouve donc entre les deux autres catégories.

4.7 Hydrodiversité des milieux humides selon la méthode cartographique

Les milieux humides peuvent également être représentés en tenant compte à la fois de leur position dans les dépôts meubles et dans le réseau hydrographique (Figure 4.4).

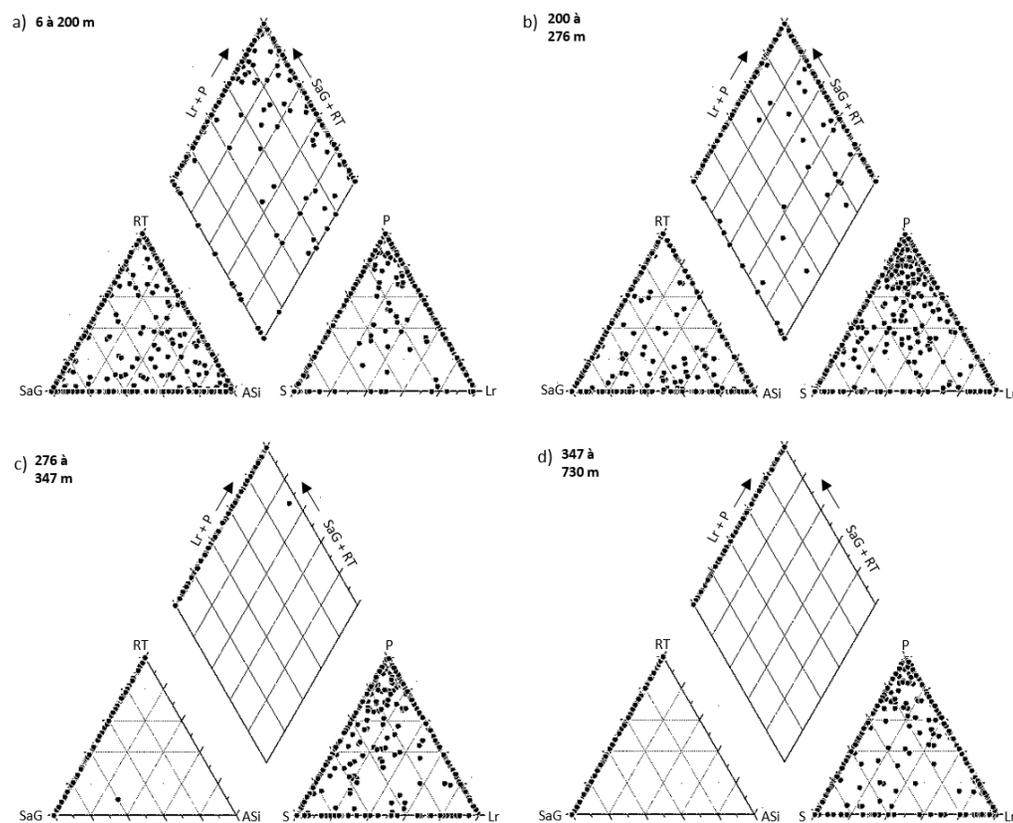


Figure 4.4 : Connectivité au réseau hydrographique et aux dépôts meubles selon l'élévation pour tous les milieux humides de la zone d'étude. RT : Roc et till, SaG : Sable et gravier, ASi : Argile et silt, P: cours d'eau passant dans les milieux humides, S: cours d'eau commençant et sortant des milieux humides et LR: lacs et rivières partageant une portion de périmètre avec les milieux humides

Plus l'élévation augmente, plus les milieux humides touchent au roc et au till. Pour la catégorie d'élévation la plus grande, tous les milieux humides touchent soit au roc et dépôts de till, soit aux dépôts de sable et gravier. Ceci concorde avec l'emplacement de l'argile dans les vallées et dans le sud de la région d'étude (altitudes plus basses). Les trois types de connexion au réseau hydrographique sont présents, peu importe la classe d'élévation.

4.8 Classement des tourbières étudiées avec la méthode cartographique

L'hydrodiversité des 46 tourbières étudiées à l'aide la méthode TDS-végétation a également été déterminée dans le but de comparer les résultats des deux méthodes. Afin de faciliter la comparaison, les classes d'altitude utilisées dans les sections précédentes sont conservées ici. Ceci fait en sorte que les tourbières ne sont pas réparties également dans chaque catégorie (Tableau 4.6). La catégorie d'élévation de 276 à 347 m a le plus petit nombre de tourbières (4) et la catégorie d'élévation de 200 à 276 m a le plus grand nombre de tourbières (30).

Tableau 4.6 : Répartition de tourbières selon les catégories d'élévation de la méthode cartographique

Catégories d'élévation moyenne (m)	Nombre de tourbières
6 à 200	5
200 à 276	29
276 à 347	4
347 à 730	8

Une seule parmi les 46 tourbières visitées est en contact partiel avec des dépôts d'argile et de silt (Figure G.1). Les tourbières touchent principalement à des dépôts de sable et gravier (28 tourbières), suivi du roc et des dépôts de till (14 tourbières). Trois tourbières sont en contact avec des dépôts meubles mixtes. Les tourbières touchant aux dépôts de

sable et gravier se trouvent principalement entre 200 et 276 m (21 tourbières). Les tourbières touchant au roc et dépôts de till sont présentes à toutes les élévations, sauf à la catégorie la plus basse (6 à 200 m).

Le nombre de tourbières en contact avec les dépôts de sable et gravier est le plus élevé (28) tandis que le nombre de tourbières en contact avec les trois types de dépôts est le plus faible (1; Tableau G.1). Les tourbières ne sont pas connectées aux dépôts d'argile et silt (Tableau G.1, ligne c). Elles ne présentent pas de connexions mixtes aux dépôts meubles, sauf pour une combinaison de sable et gravier et de roc et till pour certaines élévations. L'aire est la plus grande pour la seule tourbière qui touche aux trois types de dépôts (3,35 km²) alors qu'elle est minimale pour les tourbières touchant aux dépôts de sable et gravier (0,03 km²). L'élévation médiane varie entre 237 m pour les tourbières touchant au roc et dépôts de till et de sable et gravier, et 278 m pour les tourbières touchant au roc et dépôts de till. L'étendue médiane de l'élévation est minimale pour les tourbières touchant aux dépôts de sable et gravier (2 m) alors qu'elle est maximale pour les tourbières touchant au roc et dépôts de till et de sable et gravier (10 m). L'accumulation de flux est maximale pour les tourbières touchant aux trois types de dépôts (20) et elle est minimale pour les tourbières touchant au roc et dépôts de till (11).

Comme pour les autres milieux humides de la zone d'étude, les tourbières étudiées avec la méthode 1 sont principalement connectées aux cours d'eau passant (18 tourbières; Figure G.2). Quatre tourbières seulement sont la source d'un cours d'eau, trois tourbières sont en contact avec des lacs et rivières et deux tourbières ont des contacts hydrologiques mixtes. Les tourbières qui possèdent un cours d'eau passant se trouvent surtout entre 200 et 276 m. Au total, 19 tourbières sont déconnectées du réseau hydrographique, principalement entre les élévations de 200 et 276 m.

Le nombre de tourbières le plus élevé est associé aux tourbières déconnectées du réseau hydrographique (19; Tableau G.2). Les 27 autres tourbières sont connectées au réseau hydrographique (59%). Les tourbières sont le plus souvent associées au réseau hydrographique par des cours d'eau passant (18) et le moins souvent par un mélange entre les cours d'eau passant et commençant (2). L'aire médiane varie entre 0,02 km² pour les tourbières connectées au réseau hydrographique par des lacs et rivières et 2,27 km² pour les tourbières connectées au réseau hydrographique par des cours d'eau passant et commençant. L'élévation médiane est minimale pour les tourbières déconnectées du réseau hydrographique (261 m) et est maximale pour les tourbières connectées au réseau hydrographique par des lacs et rivières (376 m). L'étendue médiane de l'élévation varie entre 2 m pour les tourbières déconnectées du réseau hydrographique et 6 m pour les tourbières reliées au réseau hydrographique par des cours d'eau passant. L'accumulation de flux est la plus petite pour les tourbières connectées au réseau hydrographique par des lacs et rivières (7) et est la plus grande pour les tourbières déconnectées du réseau hydrographique (15). Aucune tourbière étudiée n'a une connexion avec le réseau hydrographique par des cours d'eau passant et des lacs et rivières, par des cours d'eau sortant et des lacs et rivières, et par des cours d'eau passant et sortant et des lacs et rivières.

4.9 Connexion aux dépôts meubles sous-jacents et au réseau hydrographique des marais et marécages

La connectivité aux matériaux géologiques sous-jacents, ainsi qu'au réseau hydrographique a été étudiée sur le terrain pour les tourbières, marais et marécages à des fins de comparaison pour la méthode cartographique (Tableau 4.7). Les matériaux géologiques sous-jacents aux tourbières, marais et marécages étaient principalement des dépôts de sable et gravier (44%, 46% et 81% respectivement). Les matériaux les moins souvent observés étaient le roc et dépôts de till pour les tourbières et marécages (14% et 6%) et l'argile et le silt pour les marais (22%). Les sédiments de 27% des

tourbières n'ont pu être identifiés sur le terrain. Tous les marais sont connectés au réseau hydrographique, i.e. qu'ils sont tous en lien avec un cours d'eau ou un lac. Parmi les sites visités, 38% des marécages et 59 % des tourbières sont déconnectés des cours d'eau et des lacs. Le mode de connexion dominant au réseau hydrographique pour les marais, marécages et tourbières est par des cours d'eau passant (83%, 38% et 26% respectivement). Peu de marais et peu de tourbières ont des cours d'eau sortants (7% et 8% respectivement) ou des connexions à des cours d'eau et des lacs (9% et 8% respectivement).

Tableau 4.7 : Connexion aux dépôts meubles sous-jacents et au réseau hydrographique pour les différents milieux humides étudiés sur le terrain à des fins de comparaison avec la méthode cartographique. RT : Roc et till, SaG : Sable et gravier, ASi : Argile et silt, P: cours d'eau passant dans les milieux humides, S: cours d'eau commençant et sortant des milieux humides et LR: lacs et rivières partageant une portion de périmètre avec les milieux humides

Type de milieu humide	Connexion aux dépôts meubles sous-jacents (%)				Connexion au réseau hydrographique (%)			
	ASi	RT	SaG	Déconnexion	S	P	LR	Déconnexion
Marais	22	32	46	0	7	83	9	0
Marécages	13	6	81	0	13	38	13	38
Tourbières	14	14	44	27	8	26	8	59

CHAPITRE V

DISCUSSION

Ce chapitre présente la discussion des résultats des deux méthodes, une comparaison entre les deux méthodes et une synthèse des connexions hydrologiques des milieux humides dans la région étudiée. Les avantages et les lacunes des deux méthodes, des recommandations et un bilan des résultats en découlent.

5.1 Caractéristiques des tourbières étudiées

Globalement, les épaisseurs de tourbe mesurées correspondent aux valeurs d'autres études dans la même zone d'étude (Muller, 2002). Elles sont également similaires aux valeurs retrouvées dans le Centre-du-Québec et en Abitibi-Témiscamingue (Ferlatte *et al.*, 2015). L'accumulation de tourbe dépend principalement de la température de l'air et la présence d'eau (Xintu, 2009), et est donc influencée par les conditions climatiques, géologiques, géomorphologiques et hydrologiques. Il était attendu d'observer une différence d'épaisseur selon l'unité géologique puisque leur géomorphologie n'est pas la même (Figure D.2). La province de Grenville est caractérisée par de nombreuses vallées et est formée par des roches cristallines peu perméables, ce qui permet l'accumulation d'eau et favorise la formation de tourbe dans les cuvettes. Les Basses-Terres du Saint-Laurent sont recouvertes de dépôts peu perméables qui ont un mauvais drainage. Toutefois, elles sont caractérisées par un terrain plat qui ne permet pas autant de retenir l'eau. Ceci peut donc expliquer la différence d'épaisseur de tourbe observée.

Les épaisseurs de tourbe plus grandes au centre des tourbières qu'en bordure concordent avec la morphologie généralement observée des tourbières en cuvette du Québec (Proulx-McInnis *et al.*, 2013). L'épaisseur de la tourbe n'est toutefois pas affectée par la distance du bord de la tourbière puisque cette mesure n'est pas normalisée par la superficie des tourbières. En effet, une station d'échantillonnage dans une petite tourbière peut se trouver au centre, mais néanmoins proche du bord, tandis qu'une station dans une grande tourbière peut se trouver dans la partie minérotrophe d'une tourbière, mais se trouver à une grande distance du bord. Il était aussi attendu que la profondeur de la nappe n'ait pas de lien avec l'épaisseur de tourbe puisque les profondeurs de nappe n'ont été mesurées qu'une fois au cours de l'été et à différents moments pour chaque tourbière et qu'elles ne représentent pas les conditions hydrologiques moyennes de surface. Ces dernières contrôlent le rythme d'accumulation de tourbe et peuvent varier au cours des millénaires (Xintu, 2009).

Il était aussi attendu que la province géologique (Figure B.1), la position dans la tourbière (Figure B.2) et la distance du bord de la tourbière (Figure B.3) n'aient pas d'impact significatif sur la profondeur de la nappe, ce qui a été prouvé par les analyses statistiques. En effet, les profondeurs de nappe n'ont pas été mesurées selon un patron régulier sur des transects définis et n'ont pas été mesurées à divers moments durant la période d'échantillonnage, ce qui empêche de faire une étude des tendances.

Les tourbières étudiées à l'aide des indicateurs de végétation et des STD se trouvent principalement sur des dépôts sableux. Selon la méthode cartographique, les matériaux géologiques adjacents à ces mêmes tourbières sont majoritairement des dépôts sableux et graveleux. En général, le sable a une conductivité hydraulique plutôt élevée (Freeze et Cherry, 1979), ce qui suggère que les échanges d'eau sont possibles entre les tourbières et les aquifères sableux. Un petit nombre de tourbières sont en contact latéral avec le roc et des dépôts de till selon la méthode cartographique. Selon les observations sur le terrain, elles se situent également directement sur le roc ou sur des dépôts de till,

un contexte dans lequel les échanges d'eau sont également possibles (Rosa *et al.*, 2018). La majorité des tourbières seraient donc en connexion avec l'eau souterraine. Les sédiments sous-jacents aux tourbières sont comparables aux sédiments sous-jacents de tourbières dans les Laurentides (Roux, 2019) et dans d'autres régions du Québec (Avard, 2013; Ferlatte *et al.*, 2015).

La végétation indicatrice a été observée plus souvent dans la province de Grenville que dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, car plus de tourbières y ont été étudiées. La végétation indicatrice la plus observée est celle composée d'une seule espèce soit *Carex limosa* ou *Sphagnum russowii*. La végétation indicatrice composée de plusieurs espèces végétales différentes était plus dure à observer sur le terrain en raison de la différence d'échelle entre les différentes espèces, surtout dans les tourbières boisées où la végétation très dense empêche d'avoir une bonne visibilité. En effet, certaines espèces à reconnaître étaient des sphaignes ne mesurant que quelques centimètres, alors que d'autres étaient des arbres de quelques mètres de hauteur. Ceci a rendu l'identification durant les déplacements plus ardue. À l'échelle du Québec, il existe un gradient des espèces végétales liées aux conditions chimiques dans les tourbières (pH, conductivité, alcalinité, cations; Campbell et Rochefort, 2001). Des variations chimiques à l'échelle régionale pourraient avoir un impact sur les espèces et associations d'espèces liées à un apport d'eau souterraine. Pour cette raison, les espèces indicatrices dans les Laurentides sont peut-être différentes de celles du Centre-du-Québec et de l'Abitibi présentées dans Munger *et al.* (2014).

5.2 Conversion de la conductivité électrique en solides totaux dissous

Le nombre de tourbières ayant des apports d'eau souterraine confirmés, potentiels ou limités varie beaucoup selon les différents facteurs de conversion et la valeur seuil utilisée pour départager les conditions. Plus le facteur est petit, plus le nombre de connexions confirmées est petit et plus le nombre connexions limitées est grand. Un

facteur de conversion plus élevé mène à des STD plus élevés, ce qui permet d'obtenir un plus grand nombre de connexions confirmées. La forme de la tourbière, la position dans la tourbière et la nature des sédiments sous-jacents ont été analysées afin de vérifier si un des facteurs de conversion représente mieux la réalité, mais il n'a pas été possible d'identifier un facteur plus approprié qu'un autre. Peu importe le facteur de conversion, la tendance générale suggère que les tourbières étudiées sont en majorité potentiellement connectées à l'eau souterraine.

Les différentes valeurs seuil indicatrices de connexions aquifère-tourbière rapportées par Larocque *et al.* (2016) entre le Centre-du-Québec et l'Abitibi-Témiscamingue suggèrent que ces seuils peuvent varier d'une région à l'autre. D'ailleurs, dans la zone d'étude, la CE des tourbières des Basses-Terres du Saint-Laurent est statistiquement plus grande que celle dans la province de Grenville. La composition chimique de l'eau souterraine, et par le fait même les STD, dépendent des interactions avec les matériaux géologiques formant l'aquifère et de la nature des minéraux qui les composent (Hem, 1985). En effet, certains minéraux comme les minéraux carbonatés peuvent plus facilement être dissous alors que les minéraux silicatés sont plus difficilement dissous dans l'eau (Elango et Kannan, 2007). Puisque la Plate-forme du Saint-Laurent est composée de roches sédimentaires riches en carbonates, il serait logique que la valeur seuil des STD soit plus élevée dans cette région. À l'opposé, puisque les roches de la province de Grenville sont plus riches en minéraux silicatés, il serait attendu que la valeur seuil des STD y soit plus faible. Il est donc possible que le seuil utilisé soit trop élevé pour la province de Grenville, ce qui a pu causer une sous-estimation des cas de connexion avec l'eau souterraine.

L'apport d'eau souterraine par la méthode des indicateurs tient également compte de la présence de la végétation indicatrice sur le terrain. La végétation indicatrice a été observée à 27% des stations d'échantillonnage. Pour les tourbières ayant un apport d'eau potentiel, le nombre de fois où la végétation indicatrice est présente est plus petit

que le nombre de fois où les STD dépassent la valeur critique, et ce, pour tous les facteurs de conversion (Tableau 4.4). La végétation est donc le facteur le plus limitant pour passer « d'apport d'eau souterraine potentiel » à « apport d'eau souterraine confirmé ». De plus, la végétation est plus limitante lorsque le facteur de conversion est grand. En effet, lorsque le facteur de conversion est grand, le nombre de fois où les STD dépassent la valeur critique est plus élevé. Puisque peu de temps sur le terrain a été accordé sur le terrain à la reconnaissance de la végétation, des ajustements seraient nécessaires pour reproduire la méthode.

5.3 Connexion des milieux humides aux dépôts meubles

La position des différents milieux humides dans les dépôts meubles permet de déterminer les interactions potentielles avec l'eau souterraine et avec l'eau de surface. Les milieux humides touchant au roc et dépôts de till et aux dépôts de sable et gravier ont une connexion plus probable avec les aquifères environnants comparativement aux milieux humides touchant aux dépôts d'argile et de silt. Les milieux humides touchant aux dépôts peu perméables peuvent également avoir des échanges d'eau avec les aquifères, mais les flux échangés sont probablement faibles. Ils peuvent également avoir des échanges avec les sédiments sous-jacents qui n'ont pas été identifiés à l'aide de la méthode cartographique. Les milieux humides en contact latéral avec des sédiments peu perméables agissent comme une charge constante, ce qui contribue à maintenir le niveau de la nappe dans les dépôts inorganiques en dehors des milieux humides.

Dans la zone d'étude, les milieux humides sont majoritairement entourés par le roc et de dépôts de till. Ceci concorde avec la présence de till sur environ 65% de la zone d'étude. Ces milieux humides se trouvent généralement à une élévation élevée où le roc est affleurant sur les hauts topographiques. Ceci ne concorde pas avec les résultats de Rosa *et al.* (2018). Cette non-concordance peut s'expliquer par le fait que le contexte

géologique est différent en Abitibi-Témiscamingue (vaste plaine argileuse) que dans les Laurentides.

Les milieux humides touchant au roc et aux dépôts de till ont une aire de drainage légèrement supérieure à celle des milieux humides associés au sable et gravier. Ceci suggère qu'ils reçoivent plus d'écoulements de surface. Les milieux humides touchant aux dépôts de sable et gravier sont moins nombreux que ceux touchant au roc et dépôts de till, mais plus nombreux que ceux touchant aux dépôts argileux et silteux. Ce résultat s'explique par le fait que les sable et gravier représentent 25% de la surface des dépôts sur la zone d'étude. Ils ont une élévation moyenne qui concorde avec leur répartition dans la zone d'étude, soit parfois dans les vallées et parfois formant des eskers et crêtes de plus grande élévation. Ils ont la plus petite aire de drainage, ce qui suggère qu'ils reçoivent moins d'eau de surface.

Les milieux humides touchent le moins souvent aux dépôts d'argile et de silt. Ceux-ci se trouvent à de plus faibles élévations, ce qui est représentatif de la faible couverture de dépôts argileux sur la zone d'étude (6%) et de leur position dans la portion sud. De plus, ils ont la plus grande aire de drainage, ce qui suggère qu'ils reçoivent plus d'eau de surface. Globalement, les milieux humides qui ne touchent qu'à un seul type de dépôt sont plus fréquents que ceux touchant à plusieurs types de dépôts. Les milieux humides qui touchent aux trois types de dépôts ont aussi une plus grande aire (médiane de 0,07 km²). Ceci suggère qu'une aire plus grande permet de toucher à une plus grande variété de dépôts meubles, ce qui concorde avec les résultats de Rosa *et al.* (2018). Toutefois, ces grands milieux humides sont peu nombreux sur la zone d'étude.

5.4 Connexion des milieux humides au réseau hydrographique

La position des milieux humides dans le réseau hydrographique permet de déterminer leurs connexions avec l'eau de surface. Les milieux humides dans lesquels un ou

plusieurs cours d'eau commencent permettent d'alimenter le réseau hydrographique en accumulant temporairement de l'eau pouvant provenir des précipitations, de l'écoulement de surface et des aquifères. Les milieux humides dans lesquels les cours d'eau ne font que passer et ceux dont le périmètre touche à un lac ou une large rivière peuvent agir comme des réservoirs temporaires d'eau s'ils sont connectés hydrauliquement aux cours d'eau et au lac.

Dans la région étudiée, les milieux humides sont principalement connectés au réseau hydrographique par des cours d'eau passant (P), ce qui concorde avec les observations de Rosa *et al.* (2018) en Abitibi-Témiscamingue. Les autres milieux humides sont connectés en nombres similaires aux cours d'eau qui prennent leur source dans le milieu humide (S) et aux lacs et rivières en bordure des milieux humides (LR). Les milieux humides dans lesquels les cours d'eau prennent naissance se trouvent aux plus grandes élévations selon les trois catégories (P, S et LR). Ils ont aussi une plus petite aire de drainage que les milieux humides dans lesquels un cours d'eau passe, ce qui suggère qu'ils se retrouvent plus en tête de bassins versants et qu'ils alimentent le réseau hydrographique. Les milieux humides dans lesquels un cours d'eau passe ont la plus grande aire de drainage, ce qui reflète leurs positions variées dans la zone d'étude. Les élévations plus faibles et les plus petites aires de drainage des milieux humides dont le périmètre touche à des lacs et rivières montrent qu'ils se retrouvent dans des petites dépressions topographiques locales où ils stockent de l'eau temporairement. Comme pour la connexion aux dépôts meubles, les milieux humides ayant plusieurs types de connexion au réseau hydrographique ont la plus grande aire (médiane de 0,07 km²), ce qui correspond aux observations de Rosa *et al.* (2018). Ceci suggère que plus les milieux humides sont grands, plus leur connexion au réseau hydrographique est diversifiée. Toutefois, ces grands milieux humides sont moins nombreux que les milieux humides n'ayant qu'un seul type de connexion.

À de faibles élévations, les milieux humides sont principalement déconnectés du réseau hydrographique. Selon la carte d'utilisation du territoire (Figure 2.6), la zone qui se trouve entre ces élévations est classée agricole et urbaine et se trouve dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. Les cours d'eau y sont moins denses et plus linéaires que sur la province de Grenville. Ceci suggère que les activités anthropiques liées à l'agriculture et l'urbanisation ont modifié les connexions au réseau hydrographique et que le réseau hydrographique dans les Basses-Terres du Saint-Laurent est différent de celui sur la Province de Grenville. En effet, les activités agricoles et l'urbanisation sont les facteurs principaux de la perte et de la modification des cours d'eau (Paul et Meyer, 2001). Au Québec, entre les années 1917 et 1986, le redressement des cours d'eau était encouragé par le gouvernement dans les zones agricoles pour favoriser la productivité (MAPAQ, 2001). Dans les Basses-Terres du Saint-Laurent au Québec, il est estimé qu'environ 30 000 km de rivières ont été redressées (Rousseau et Biron, 2009). Ainsi, les activités anthropiques pourraient avoir diminué la connexion entre les milieux humides et l'eau de surface dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. La protection des milieux humides riverains est particulièrement importante dans un contexte de gestion durable des MHH. En effet, ceux-ci font partie de l'espace de liberté des rivières et cours d'eau et ont plusieurs fonctions hydrologiques qui peuvent les bénéficier tels que le stockage de l'eau de crue ou le maintien des débits en étiage (Biron *et al.*, 2014).

5.5 Hydrodiversité des milieux humides

Les milieux humides peuvent être catégorisés selon leur connexion à l'eau souterraine et selon leur fonction dans le réseau hydrologique. Les milieux humides peuvent être connectés ou déconnectés de l'eau souterraine, et ils peuvent alimenter le réseau hydrographique ou stocker l'eau temporairement. Les milieux humides connectés aux aquifères sont ceux qui touchent au roc et dépôts de till, ainsi qu'aux dépôts de sable et gravier. Ils correspondent au côté supérieur droit du losange à la Figure 4.4. Les milieux humides qui stockent l'eau temporairement sont ceux qui sont connectés au

réseau hydrographique par les lacs et rivières et par les cours d'eau passant. Ils correspondent au côté supérieur gauche du losange sur la Figure 4.4. Ces deux catégories permettent de déterminer l'hydrodiversité des milieux humides.

L'hydrodiversité des milieux humides peut être représentée sur un bassin versant fictif (Figure 5.1). Les milieux humides en tête de bassin versant sont ceux connectés au roc et dépôts de till, ainsi qu'aux dépôts de sable et gravier. Ils correspondent à la première rangée et représentent les milieux humides connectés à l'eau souterraine. Ils se trouvent à de grandes élévations avec des valeurs variant de 275,4 m (1C) à 301,8 m (1A). A l'opposé, les milieux humides près de l'exutoire sont connectés aux dépôts d'argile et de silt. Ils correspondent à la troisième rangée et sont déconnectés de l'eau souterraine. Leur élévation est plus faible, avec des valeurs variant entre 65,5 m (3C) et 176,7 m (3B).

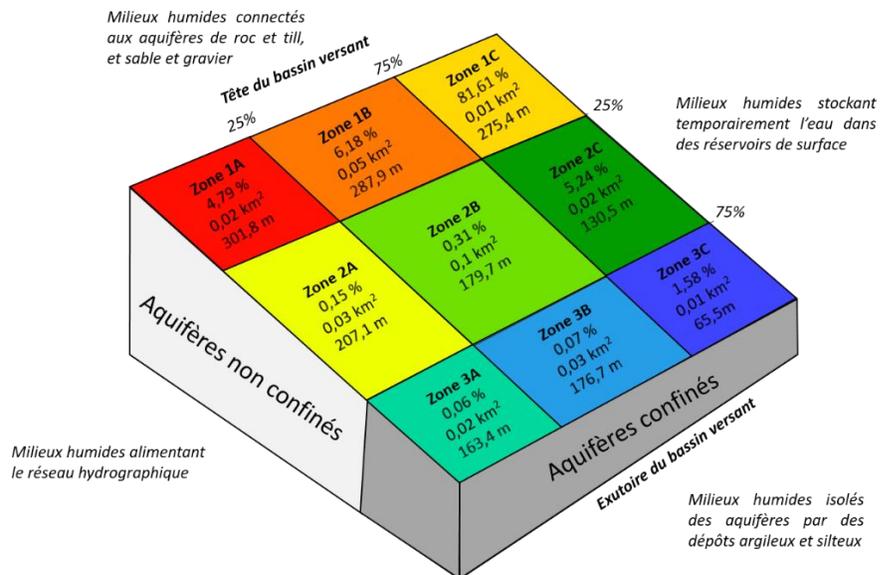


Figure 5.1 : Répartition des milieux humides dans un bassin versant fictif selon leur hydrodiversité, adaptée de Rosa *et al.* (2018) pour la région d'étude. Le pourcentage représente la superficie couverte par les milieux humides à l'échelle régionale. Les valeurs en « km² » représentent la superficie médiane des milieux humides alors que les valeurs en « m » représentent l'élévation médiane des milieux humides.

Les milieux humides connectés au réseau hydrographique par des lacs et rivières et par des cours d'eau passant (colonne C) permettent de stocker l'eau temporairement sur le bassin versant. Leur élévation est la plus faible dans chacune des rangées avec des valeurs variant entre 65,5 m (3C) et 275,4 m (1C). Au contraire, les milieux humides dans lesquels un cours d'eau commence (colonne A) alimentent le réseau hydrographique en eau. Leur élévation est la plus grande dans chaque rangée, sauf pour la 3^e, puisqu'ils alimentent le réseau hydrographique et sont donc en tête de bassins versants. Celle-ci varie entre 163,4 m (3A) et 301,8 m (1A).

À l'échelle régionale, les milieux humides sont connectés au roc et aux dépôts de till, ainsi qu'aux cours d'eau passants (Figure 5.2). Les milieux humides alimentant le réseau hydrographique se retrouvent en tête de bassin alors que les milieux humides qui stockent temporairement l'eau se retrouvent sur l'ensemble du territoire. Les milieux humides déconnectés de l'eau souterraine se trouvent dans le bas des bassins versants. La majorité des milieux humides sont connectés aux aquifères. Les petits milieux touchent généralement à un seul de type de dépôt et n'ont qu'une seule connexion au réseau hydrographique. Au contraire, les grands milieux touchent à plusieurs de types de dépôts et ont plusieurs connexions avec le réseau hydrographique. Toutefois ceux-ci sont peu nombreux sur le territoire.

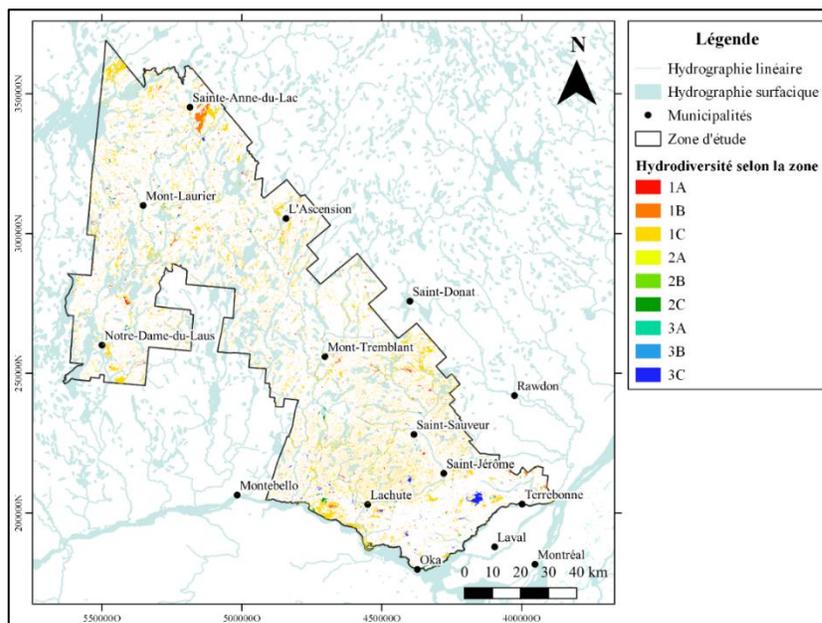


Figure 5.2 : Répartition de l'hydrodiversité des milieux humides sur la zone en fonction des neuf catégories

5.6 Avantages et limites des approches

La méthode basée sur les indicateurs présente plusieurs avantages. D'abord, elle est peu coûteuse et nécessite peu de matériel. Elle permet d'établir le potentiel de connexion aquifère-tourbière pour un site spécifique avec des données mesurées *in situ*. Si suffisamment de données sont mesurées sur le terrain, la méthode permet également d'identifier des zones dans chaque tourbière qui présentent des connexions avec l'eau souterraine.

Toutefois, cette méthode a également plusieurs limites. D'abord, la méthode ne s'applique qu'aux tourbières. Les autres types de milieux humides présents sur la zone d'étude (marais et marécages) n'ont pas pu être testés avec cette méthode puisqu'il n'existe pas d'étude de référence. La méthode nécessite également de bonnes

connaissances sur la végétation, plus particulièrement les sphaignes, ce qui peut être contraignant pour un non-expert. Dans le cadre de travaux à l'échelle régionale, la méthode est plutôt longue puisque chaque tourbière doit être visitée pour pouvoir confirmer ou infirmer une connexion avec l'eau souterraine.

Afin d'améliorer la méthode, plusieurs modifications pourraient être réalisées. D'abord, puisque la végétation semble être le facteur le plus limitant, il serait primordial d'accorder plus de temps sur le terrain pour l'observer. Concrètement, cela implique d'employer une analyse systématique de la végétation plutôt que de faire des observations ponctuelles. Il serait aussi important de vérifier si les espèces végétales identifiées par Munger *et al.* (2014) dans d'autres régions du Québec sont également indicatrices d'apports d'eau souterraine. Également, la valeur seuil de TDS devrait être confirmée pour chaque zone d'étude selon le contexte hydrogéologique. De plus, en l'absence d'un facteur de conversion clair pour chaque environnement géologique, il serait nécessaire d'analyser en laboratoire l'eau souterraine et l'eau de la nappe dans la tourbière pour avoir une évaluation plus fiable des STD.

La méthode cartographique permet d'identifier les milieux humides connectés à l'eau souterraine et à l'eau de surface. L'avantage principal de la méthode est sa facilité de mise en œuvre avec des bases de données existantes et sans travaux de terrain. Aussi, la méthode permet de faire une analyse à l'échelle régionale, ce qui est très attractif pour les acteurs de l'eau et du territoire.

Toutefois, la méthode présente aussi quelques limitations. La qualité des résultats dépend de la qualité des données utilisées pour faire l'analyse spatiale. Différents problèmes ont été observés avec ces données. D'abord, la densité des milieux humides n'est pas uniforme sur la couche des milieux humides potentiels de 2019 (MELCC, 2019b) qui se base sur huit sources différentes qui n'ont pas la même couverture et précision (Tableau 5.1). Ceci est particulièrement visible dans la portion sud zone

d'étude où une la densité de milieux humides plus grande que dans la portion nord pourrait provenir principalement de la cartographie détaillée qui y a été réalisée (Figure 2.7). Il est possible de voir une démarcation claire de densité exactement aux limites de la cartographie détaillée des milieux humides. Concrètement, on retrouve 16 384 milieux humides dans cette zone alors qu'elle a une superficie de 4 422 km², comparativement à la zone au nord qui comporte 6 819 milieux humides et qui a une superficie de 8 128 km². Ceci pose un problème puisque les milieux humides de la zone plus dense sont surreprésentés dans les analyses. Une surreprésentation peut introduire un biais dans l'analyse des résultats en donnant trop de poids à des données dans une portion limitée de la zone d'étude. Dans ce contexte particulier, les milieux humides surreprésentés se trouvent en partie dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, qui ont des caractéristiques différentes des milieux humides dans la province de Grenville.

Certains problèmes de classification surviennent également en présence de mares au centre des milieux humides et lorsque les milieux humides bordent des lacs. En effet, à plusieurs reprises, les lacs et les mares étaient cartographiés comme faisant partie à la fois de la couche des milieux humides et de celle des surfaces d'eau. Ceci pose un problème puisque cela ne permet pas de bien déterminer la connexion avec les lacs et rivières dans la méthode cartographique (LR). Aussi, le traçage de certains polygones sur la couche des milieux humides n'est pas précis, ce qui entraîne plusieurs valeurs aberrantes lors de l'extraction des élévations, particulièrement dans la province de Grenville où le terrain est marqué par de nombreuses collines. Finalement, l'analyse spatiale de la connexion aux dépôts meubles ne peut pas être réalisée lorsque les milieux humides sont entourés par d'autres milieux humides. En effet, le milieu humide entouré est spatialement déconnecté des dépôts meubles.

Tableau 5.1 : Source des données de la cartographie des milieux humides potentiels 2019 d'après MELCC (2019a)

Données	Étendue
Cartographie de l'occupation du sol des Basses-Terres du Saint-Laurent	Basses-Terres du Saint-Laurent
Cartographie détaillée des milieux humides	Plusieurs régions incluant la plaine du lac Saint-Jean, la région élargie des Basses-Terres du Saint-Laurent, l'Estrie ainsi qu'une partie de l'Outaouais et des Laurentides
Carte écoforestière de l'inventaire écoforestier du Québec méridional	Québec méridional
Atlas de conservation des terres humides de la vallée du Saint-Laurent	Vallée du Saint-Laurent
Cartographie écologique de la végétation du Nord québécois	Du 52e parallèle au nord du Québec
Programme d'inventaire écoforestier nordique	Entre le 50e et le 53e parallèle
Base de données topographiques du Québec	Territoire québécois jusqu'au 52e parallèle avec une échelle de 1/20 000
Données topographiques du Canada	Territoire canadien avec une échelle de 1/50 000

Dans ce travail, certaines opérations ont été faites pour améliorer la qualité des résultats de la méthode cartographique. Premièrement, lors de l'analyse spatiale des dépôts meubles, les milieux humides ont été regroupés par complexes afin d'éviter le phénomène de déconnexion. Ceci implique de jumeler tous les polygones de milieux humides qui se touchent en un seul polygone. Ceci entraîne toutefois la perte d'information sur le type de milieux humides associé à chaque polygone. Deuxièmement, afin d'éviter les valeurs aberrantes d'élévation causées par les problèmes de précision des polygones de milieux humides, la médiane de l'élévation a été utilisée plutôt que la moyenne. Troisièmement, afin de mieux comprendre l'alimentation en eau des milieux humides, l'accumulation de flux, un outil qui ne faisait pas partie de l'approche de Rosa *et al.* (2018), a fourni des résultats intéressants.

Finalement, il est recommandé d'utiliser des données sur la position des milieux humides qui proviennent d'une seule source, préférablement la plus fiable.

5.7 Comparaison des deux méthodes

Les résultats des deux méthodes ont été comparés afin de vérifier leur concordance. Il est attendu que les résultats soient légèrement différents puisque la méthode des indicateurs permet d'analyser les apports d'eau de l'aquifère vers les tourbières, alors que la méthode cartographique permet d'évaluer les échanges d'eau entre les milieux humides et l'eau souterraine, sans tenir compte du sens de l'échange.

Les tourbières étudiées à l'aide de la méthode des indicateurs touchent toutes au roc et aux dépôts de till ou aux dépôts de sable et gravier, ce qui est une indication qu'elles sont connectées à l'eau souterraine. L'application de la méthode cartographique aux tourbières étudiées montre que 59% de celles-ci sont connectées au réseau hydrographique. Ce pourcentage est plus faible que pour l'ensemble des milieux humides (62%), ce qui peut s'expliquer par le fait que les tourbières ont spécifiquement été choisies afin d'éviter les connexions au réseau hydrographique. Malgré tout, la majorité des tourbières étudiées sont donc connectées avec l'eau de surface par des cours d'eau passant (P).

Le facteur de conversion qui prédit le mieux cette connexion pour toutes les tourbières est le plus élevé (0,76). Avec ce facteur, cinq stations réparties sur trois tourbières auraient un apport d'eau souterraine limité, 121 stations auraient un apport potentiel et 38 stations auraient un apport d'eau souterraine confirmé (Tableau 4.3). Il est ainsi possible de créer une carte des connexions possibles à l'eau souterraine pour les tourbières étudiées à l'aide la première méthode (Figure 5.3). Les tourbières qui ont au moins une station ayant un apport d'eau souterraine confirmée sont considérées comme connectées à l'eau souterraine. Pour les tourbières qui ont des stations avec apport

potentiel et des stations avec apports limités, la majorité l'emporte. Ainsi, selon cette méthode, aucune tourbière n'a un apport limité, 22 tourbières ont un apport possible et 23 tourbières ont un apport confirmé. Les tourbières dans les Basses-Terres du Saint-Laurent ont toutes des apports confirmés à l'eau souterraine sauf une. Les tourbières recevant de l'eau souterraine sont réparties à peu près également dans la province de Grenville. La méthode 1 permet donc d'obtenir des résultats concluants avec un facteur de 0,76 et permet de valider les résultats de la méthode 2.

Considérant que la méthode des indicateurs semble valider de manière satisfaisante les résultats de la méthode cartographique pour les tourbières, il est permis de poser l'hypothèse que cette dernière donne des résultats plausibles pour l'ensemble des milieux humides de la région. Il est toutefois important de souligner que la méthode cartographique n'a pas été validée sur le terrain pour les marais et les marécages à l'aide des indicateurs. Elle a tout de même pu être confirmée par des observations de terrain. En effet, la connexion au réseau hydrographique observée sur le terrain est dominée par les cours d'eau passant, comme pour la méthode cartographique. La déconnexion au réseau hydrographique sur le terrain varie entre 0 et 59%, ce qui est supérieur aux résultats de la méthode cartographique. Ceci était attendu puisque les milieux humides déconnectés du réseau hydrographique ont été privilégiés pour l'étude de terrain.

Pour ce qui est de la connexion aux matériaux géologiques sous-jacents, les marais, marécages et tourbières visités sur le terrain sont principalement connectés aux dépôts de sable et gravier. Ce résultat diffère de celui obtenu avec la méthode cartographique et témoigne de l'utilité d'étudier les sédiments adjacents et les sédiments sous-jacents aux milieux humides pour évaluer la connectivité à l'eau souterraine. Les matériaux géologiques adjacents n'ont pas été observés sur le terrain.

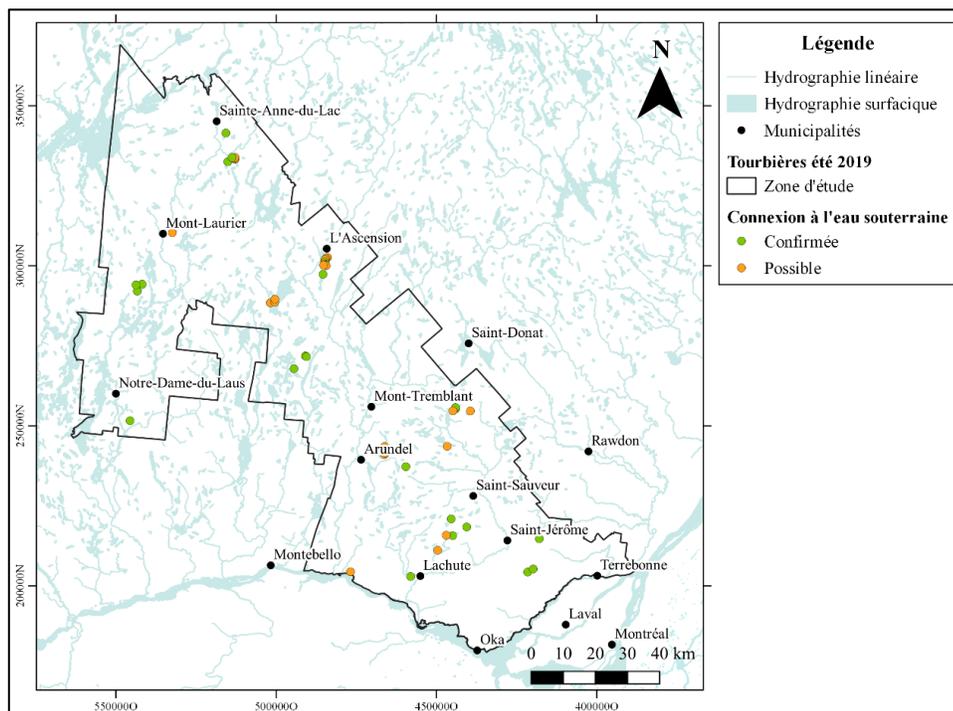


Figure 5.3 : Connexion entre les tourbières de la première méthode et l'eau souterraine avec un facteur de 0,76 et la valeur critique de 22 mg/L.

Dans le but d'illustrer la variabilité spatiale des conditions de connexion possible dans la région étudiée, les différents types de milieux humides ont été groupés en trois catégories de connexion selon la proportion du périmètre partagée avec des matériaux géologiques pouvant former des aquifères (roc, till, sable et gravier) : connexion très probable (66 à 100%), connexion possible (33-66%), connexion limitée (0-33%). Selon cette méthode, 22 027 milieux humides ont une connexion très probable, 214 milieux humides ont une connexion potentielle et 703 milieux humides ont une connexion limitée (Figure 5.4). Ce résultat concorde avec ceux rapportés dans d'autres études réalisées dans le sud du Québec et qui ont montré une connexion entre les milieux humides et l'eau souterraine (Ferlatte *et al.*, 2015; Rosa *et al.* 2018; Roux, 2019).

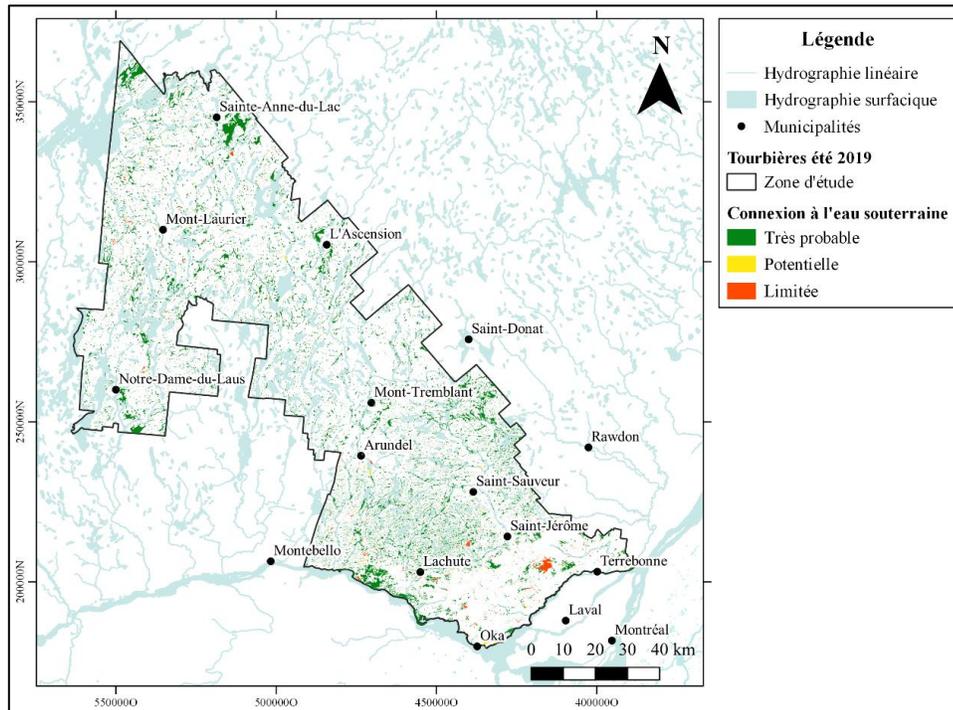


Figure 5.4 : Connexion de l'ensemble des milieux humides à l'eau souterraine

5.8 Utilisation des deux approches dans d'autres environnements géo-climatiques

Les deux approches pourraient être utilisées ailleurs au Québec ou dans des conditions géo-climatiques similaires. Au Québec, il n'existe pas encore de carte de la connexion entre les milieux humides et les aquifères qui permettrait de faciliter la prise de décision des gestionnaires du territoire dans le cadre de la protection des MHH.

Afin de pouvoir appliquer la méthode des indicateurs dans d'autres conditions, il faudrait toutefois trouver une valeur critique propre à chaque région en reproduisant les travaux réalisés par Larocque *et al.* (2016). Sans cette valeur, il n'est pas possible de localiser les apports d'eau souterraine au sein d'une tourbière. Il faudrait également

mesurer directement les STD sur le terrain plutôt que de mesurer la CE et d'utiliser un facteur de conversion. L'application de la méthode cartographique permettrait d'identifier précisément les tourbières connectées à l'eau souterraine. Ceci pourrait être un critère de protection des tourbières pour les gestionnaires du territoire.

Pour appliquer la méthode cartographique ailleurs au Québec, il serait nécessaire d'avoir les données cartographiques des milieux humides qui couvrent l'entièreté de la zone d'étude pour effectuer l'analyse spatiale (Tableau 3.3). Afin de faciliter l'analyse des résultats, il serait préférable de faire l'analyse pour chaque contexte géologique. La cartographie de l'hydrodiversité des milieux humides à l'échelle du Québec permettrait d'identifier les variétés des fonctions hydrogéologiques des milieux humides et contribuerait à la gestion intégrée de la ressource en eau et au développement des plans de protection des MHH. La préservation des milieux humides aux fonctions hydrogéologiques variées pourrait être envisagée, en protégeant des milieux humides dans chacune des catégories de la Figure 5.1 et tout particulièrement ceux dans les catégories où ils sont sous-représentés. Bien entendu, d'autres éléments comme la biodiversité locale doivent également être considérés lors du développement du plan de protection.

CHAPITRE VI

CONCLUSION

La multiplication des activités anthropiques et les changements climatiques menacent les milieux humides en modifiant leurs fonctions hydrologiques et services qu'ils rendent aux humains. La récente Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques a été adoptée pour pallier ce problème. La Loi sur l'eau impose aux MRC d'élaborer des plans de protection des milieux humides et hydriques. L'évaluation de différents outils pour identifier les milieux humides à protéger prioritairement est donc nécessaire pour assurer une gestion durable de la ressource en eau au Québec. Dans ce projet de maîtrise, deux méthodes différentes ont été étudiées sur la zone des Laurentides et la MRC Les Moulins afin d'identifier l'hydrodiversité des milieux humides, i.e. leurs différentes connexions à l'eau souterraine et à l'eau de surface.

La première méthode testée permet de déterminer la connexion entre l'eau souterraine et les tourbières en fonction d'indicateurs chimique et de végétation. Elle a montré que la majorité des tourbières étudiées sont possiblement connectées à l'eau souterraine sur la zone d'étude. Toutefois, cette approche n'a pas permis d'identifier précisément dans chacune des tourbières la localisation des échanges. Ceci est causé 1) par l'absence d'une valeur précise du facteur de conversion pour transformer les CE en STD, 2) par l'absence d'une valeur seuil spécifique pour la zone d'étude, et 3) par un petit nombre d'espèces végétales indicatrices observées. La première méthode nécessite donc des ajustements afin de pouvoir être appliquée facilement par les différents gestionnaires du territoire.

La deuxième méthode est une analyse de l'hydrodiversité des milieux humides. Elle a montré que les milieux humides touchent principalement au roc et aux dépôts de till, qui forment l'aquifère régional. Les milieux humides sont principalement connectés au réseau hydrographique par des cours d'eau passant, mais 38% des milieux humides sont déconnectés du réseau hydrographique. Cette déconnexion a principalement lieu dans le sud de la zone d'étude, en milieu agricole. La méthode cartographique est relativement simple de mise en œuvre pour analyser la connexion à l'eau de surface et l'eau souterraine à l'échelle régionale. Toutefois, elle est limitée par la qualité des couches utilisées pour faire l'analyse spatiale.

La comparaison de deux méthodes pour identifier la connectivité entre les milieux humides et l'eau souterraine a permis de déterminer les avantages et lacunes de chacune des méthodes. Différentes propositions ont été faites afin d'améliorer les deux méthodes. L'analyse a également permis d'identifier que les milieux humides dans la zone d'étude sont connectés à l'eau de surface et à l'eau souterraine. Une carte des connexions potentielles avec l'eau souterraine pour l'ensemble des milieux humides sur la zone d'étude a été développée.

Les gestionnaires de l'eau et du territoire pourraient tirer avantage de la cartographie de l'hydrodiversité des milieux humides. Ces données sont un pas de plus vers la compréhension des facteurs qui contrôlent et maintiennent l'hydrologie des milieux humides et donc vers une réelle gestion intégrée de la ressource en eau.

ANNEXE A

ANALYSES STATISTIQUES DE L'ÉPAISSEUR DE TOURBE

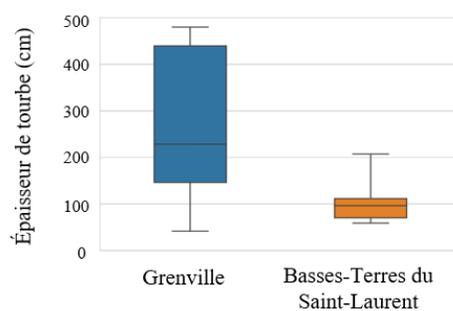


Figure A.1 : Épaisseurs de tourbe selon la province géologique (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,05$)

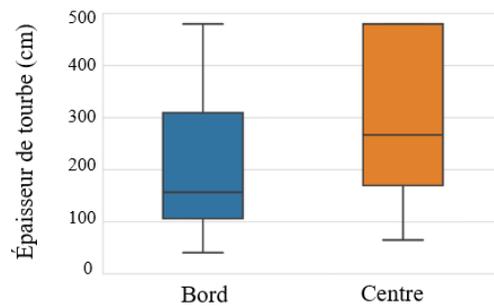


Figure A.2 : Épaisseurs de tourbe selon que la mesure est prise près du bord de la tourbière ou au centre de la tourbière (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,05$)

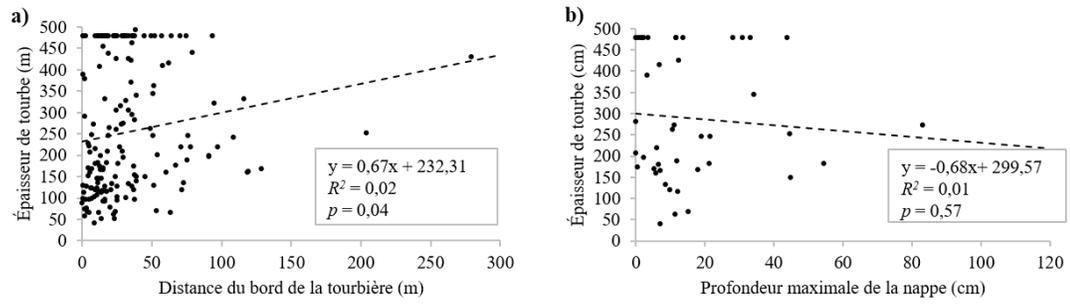


Figure A.3 : Épaisseur de tourbe en fonction de a) la distance du bord de la tourbière et b) la profondeur maximale de la nappe. Un modèle linéaire a été appliqué pour déterminer si la pente est statistiquement différente de « 0 ».

ANNEXE B

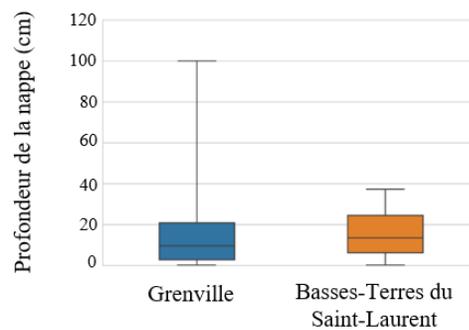
ANALYSES STATISTIQUES DE LA PROFONDEUR DE NAPPE DANS LES
TOURBIÈRES

Figure B.1 : Profondeur de la nappe en fonction de la province géologique (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p > 0,05$)

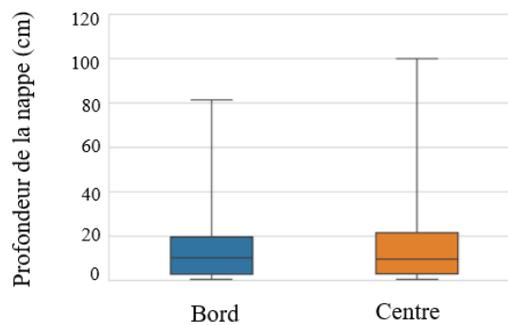


Figure B.2 : Profondeur de la nappe en fonction de la position dans la tourbière (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p > 0,05$)

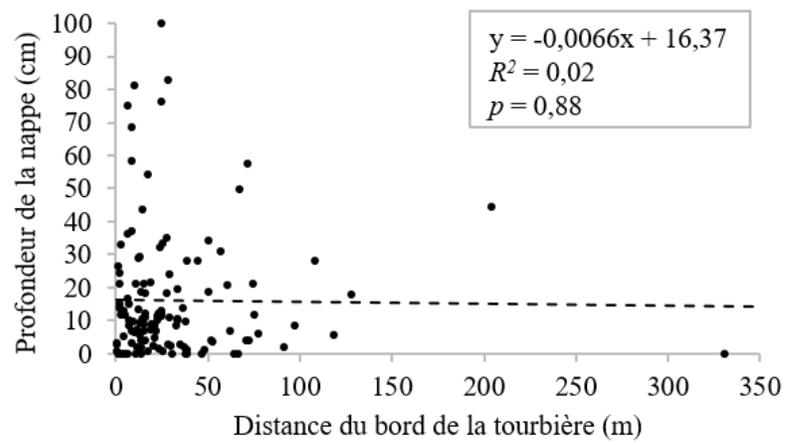


Figure B.3 : Profondeur de la nappe dans la tourbe en fonction de la distance du bord de la tourbière. Un modèle linéaire a été appliqué pour déterminer si la pente est statistiquement différente de « 0 »

ANNEXE C

FRÉQUENCE D'OBSERVATION DE LA VÉGÉTATION INDICATRICE

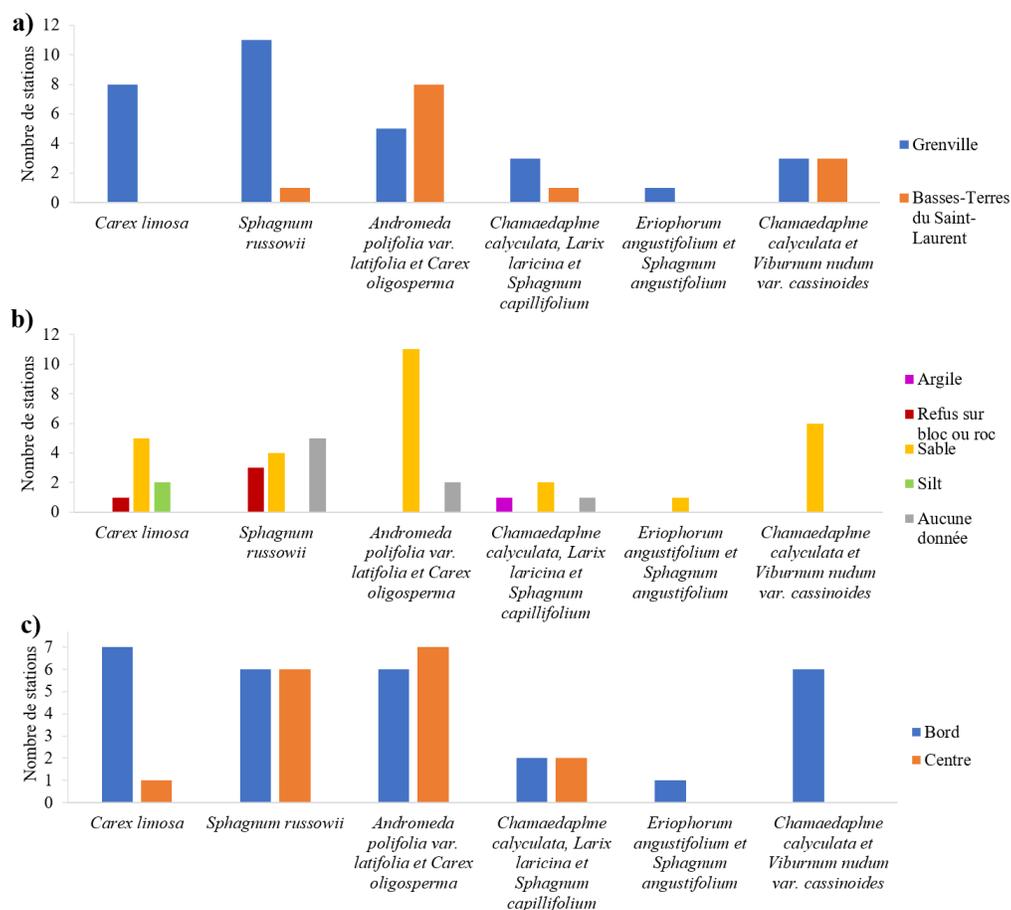


Figure C.1 : Nombre de stations où la végétation indicatrice a été observée selon a) l'unité géologique, b) les matériaux géologiques sous-jacents aux tourbières et c) la position dans la tourbière

ANNEXE D

ANALYSES STATISTIQUES DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE

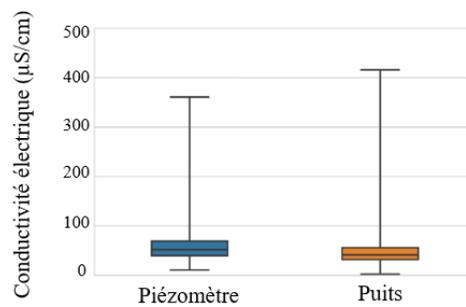


Figure D.1 : CE selon l'utilisation d'un piézomètre ou d'un puits (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,05$)

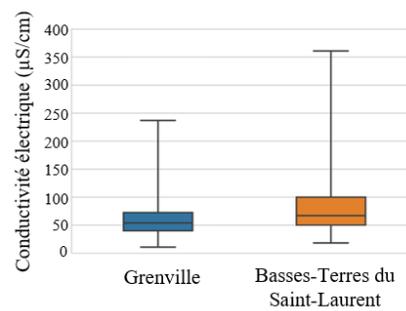


Figure D.2 : CE en fonction de l'unité géologique (test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,05$)

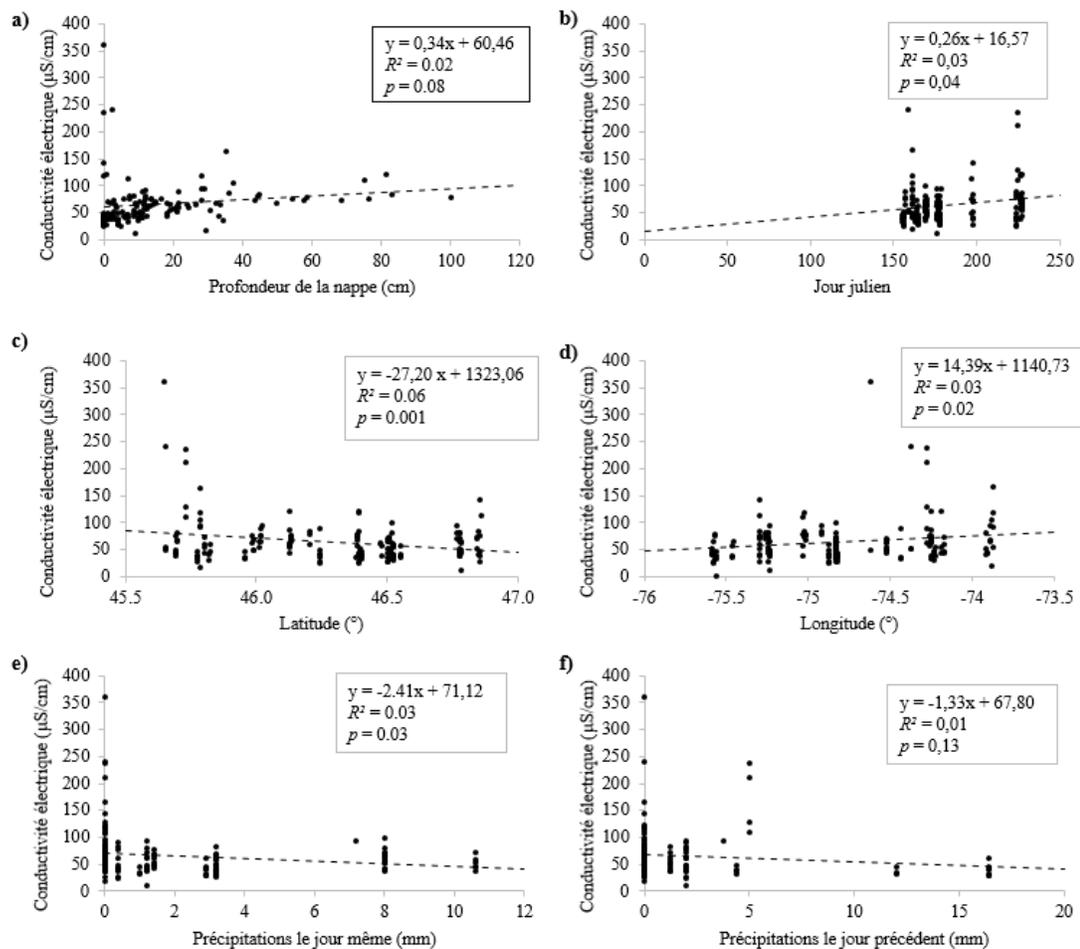


Figure D.3 : CE en fonction a) de la profondeur de la nappe, b) du jour julien, c) de la latitude, d) de la longitude, e) des précipitations le jour même et f) des précipitations le jour précédent. Un modèle linéaire a été appliqué pour déterminer si la pente est statistiquement différente de « 0 »

ANNEXE E

POSITION DES MILIEUX HUMIDES DANS LES DÉPÔTS MEUBLES

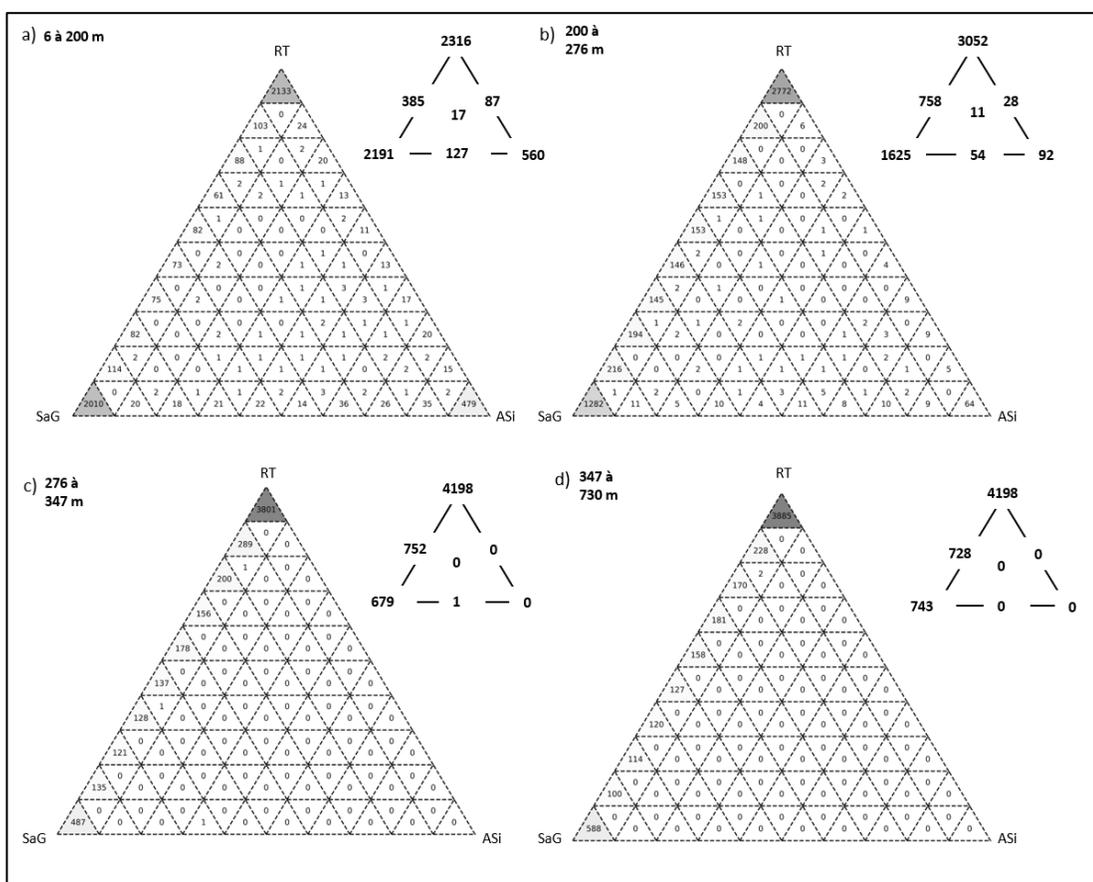
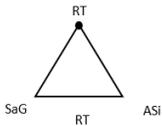
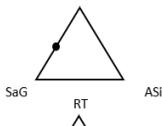
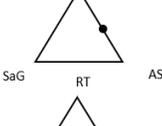
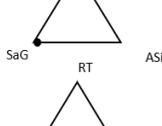
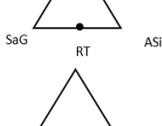
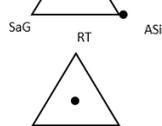
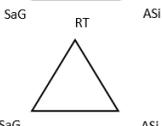


Figure E.1 : Position des tourbières dans les dépôts meubles distribués selon la catégorie d'élévation.
 RT : Roc et till, SaG : Sable et gravier et ASi : Argile et silt

Tableau E.1 : Nombre de milieux humides, aire médiane (km²), élévation médiane (m), étendue médiane de l'élévation (m) et accumulation de flux médiane selon la connexion aux dépôts meubles

	Nombre de complexes de milieux humides	Aire médiane (km ²)	Élévation médiane (m)	Étendue médiane (m)	Accumulation de flux médiane
a) 	13766	0.01	302	4	10
b) 	2623	0.02	290	5	8
c) 	115	0.03	136	7	10
d) 	5238	0.02	222	4	9
e) 	182	0.02	136	6	8
f) 	652	0.01	66	5	11
g) 	28	0.07	169	11	12
h) 	337	0.0002	277	1	8

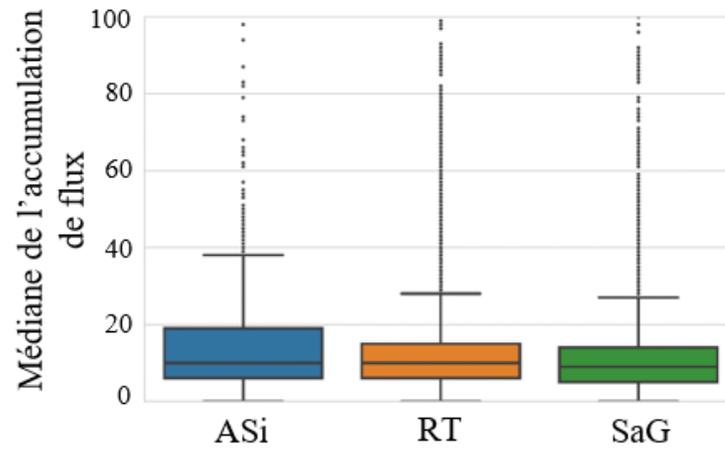


Figure E.2 : Comparaison de l'accumulation de flux selon la connexion à différents types de dépôts meubles. ASi : Argile et silt, RT : Roc et till et SaG : Sable et gravier

ANNEXE F

POSITION DES MILIEUX HUMIDES DANS LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

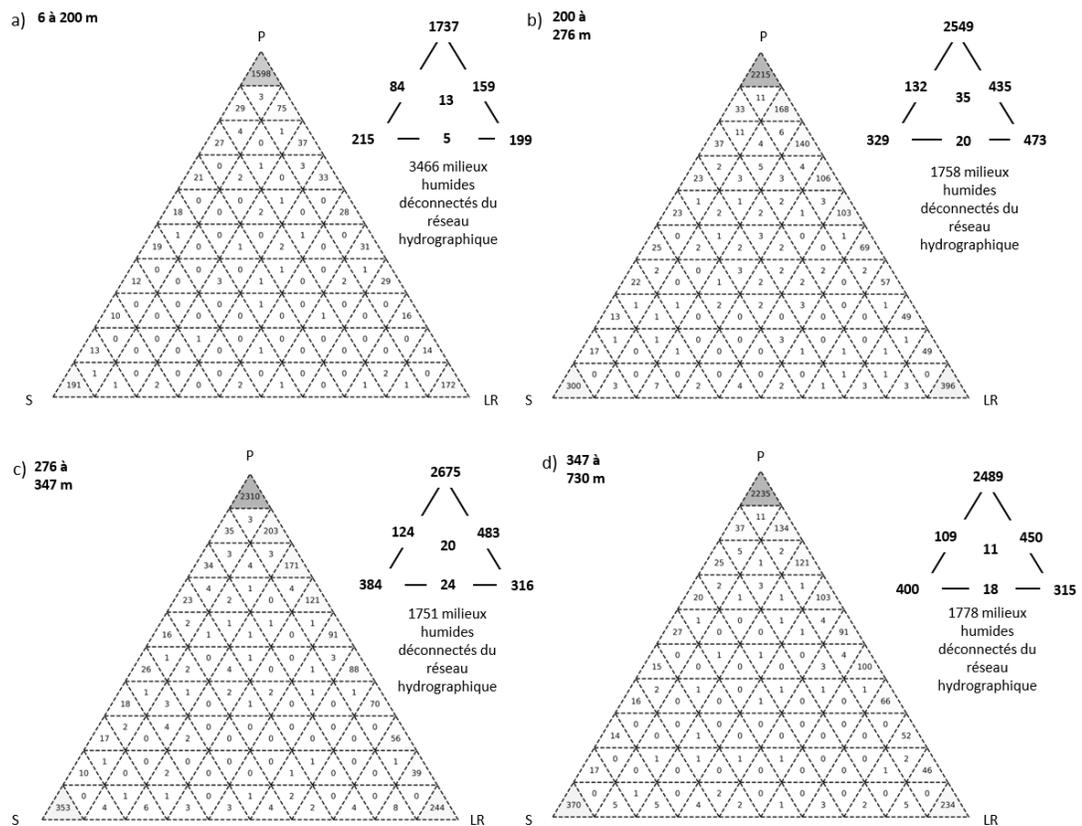
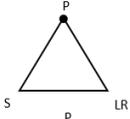
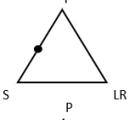
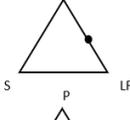
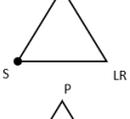
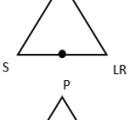
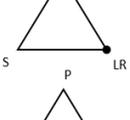
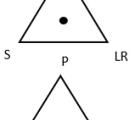
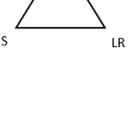


Figure F.1 : Connectivité avec le réseau hydrographique selon la classe d'élévation. P: cours d'eau passant dans les milieux humides, S: cours d'eau commençant et sortant des milieux humides et LR: larges cours d'eau partageant une portion de périmètre avec les milieux humides

Tableau F.1 : Nombre de complexes de milieux humides, aire médiane (km²), élévation médiane (m), étendue médiane de l'élévation (m) et accumulation de flux médiane selon le type de connexion au réseau hydrographique

		Nombre de complexes de milieux humides	Aire médiane (km²)	Élévation médiane (m)	Étendue médiane (m)	Accumulation de flux médiane
a)		9451	0.02	286	6	11
b)		449	0.06	283	9	9
c)		1527	0.02	301	4	7
d)		1328	0.02	300	5	10
e)		67	0.001	295	6	5
f)		1303	0.01	272	3	7
g)		79	0.07	258	8	6
h)		8736	0.01	247	3	8

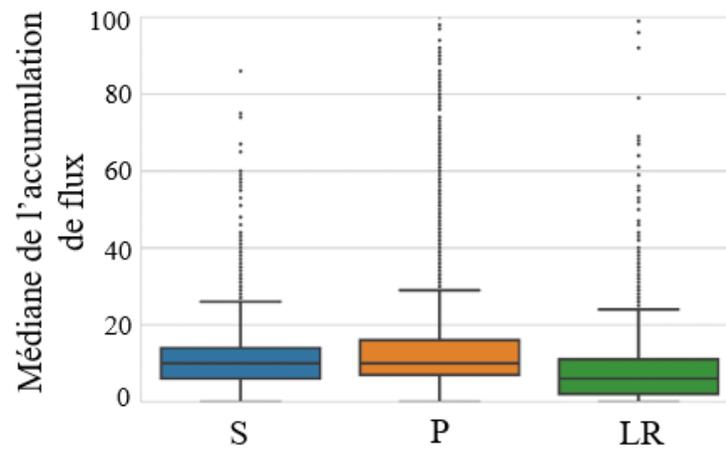
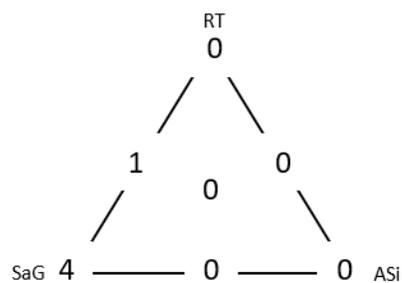


Figure F.2 : Comparaison de l'accumulation de flux selon le type de connexion au réseau hydrographique. S : cours d'eau commençant et sortant des milieux humides, P : cours d'eau passant dans les milieux humides et LR : lacs et rivières

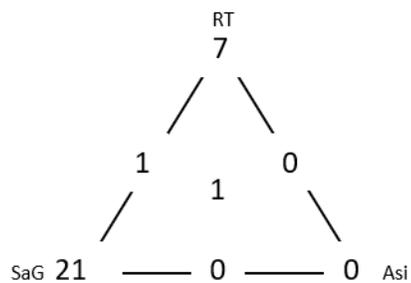
ANNEXE G

CLASSEMENT DES TOURBIÈRES ÉTUDIÉES AVEC LA MÉTHODE
CARTOGRAPHIQUE

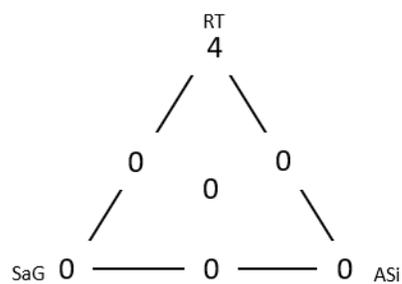
a) 6 à 200 m



b) 200 à 276 m



c) 276 à 347 m



d) 347 à 730 m

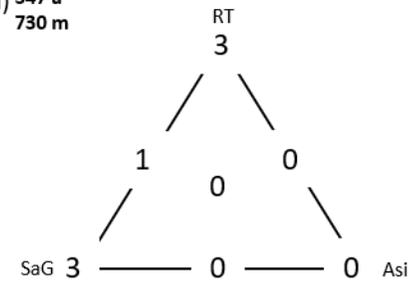
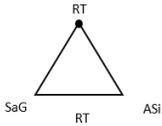
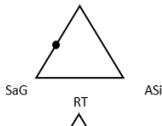
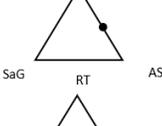
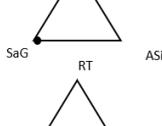
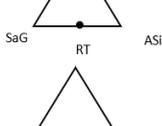
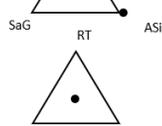
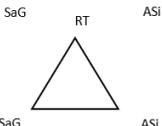


Figure G.1 : Connexion aux dépôts meubles selon l'élévation pour les tourbières étudiées. RT : Roc et till, SaG : Sable et gravier et ASi : Argile et silt

Tableau G.1 : Nombre de tourbières, aire médiane (km²), élévation médiane (m), étendue médiane de l'élévation (m) et accumulation de flux médiane selon le type de connexion aux dépôts

	Nombre de tourbières	Aire médiane (km ²)	Élévation médiane (m)	Étendue médiane (m)	Accumulation de flux médiane
a) 	14	0.05	278	6	11
b) 	3	0.14	237	10	15
c) 	0	0.00	0	0	0
d) 	28	0.03	260	2	12
e) 	0	0.00	0	0	0
f) 	0	0.00	0	0	0
g) 	1	3.35	270	8	20
h) 	0	0.00	0	0	0

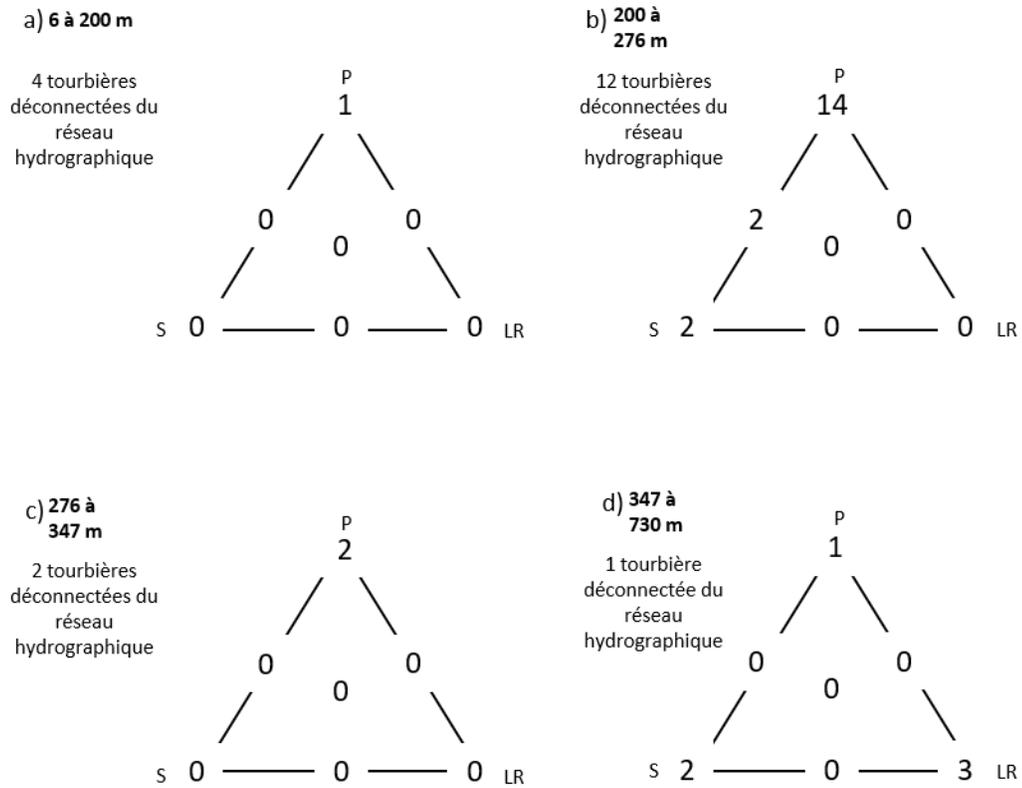
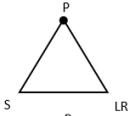
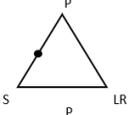
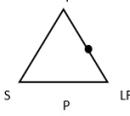
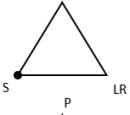
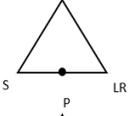
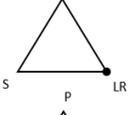
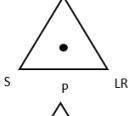
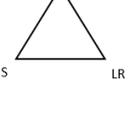


Figure G.2 : Connexion au réseau hydrographique selon l'élévation pour les tourbières étudiées à l'aide de la première méthode. P: cours d'eau passant dans les milieux humides, S: cours d'eau commençant et sortant des milieux humides et LR: lacs et rivières partageant une portion de périmètre avec les milieux humides

Tableau G.2 : Nombre de tourbières, aire médiane (km²), élévation médiane (m) étendue médiane de l'élévation (m) et accumulation de flux médiane selon le type de connexion au réseau hydrographique

		Nombre de tourbières	Aire médiane (km ²)	Élévation médiane (m)	Étendue médiane (m)	Accumulation de flux médiane
a)		18	0.05	263	6	10
b)		2	2.27	226	5	8
c)		0	0.00	0	0	0
d)		4	0.05	326	4	11
e)		0	0.00	0	0	0
f)		3	0.02	376	3	7
g)		0	0.00	0	0	0
h)		19	0.03	261	2	15

RÉFÉRENCES

- Acreman, M. et Holden, J. (2013). How wetlands affect floods. *Wetlands*, 33(5), 773-786.
- Andersen, R., Rochefort, L. et Landry, J. (2011). La chimie des tourbières du Québec: une synthèse de 30 années de données. *Le Naturaliste canadien*, 135(1), 5-14.
- Australia Waterwatch. (2002). Physical and Chemical Parameters. Dans *Waterwatch Australia National Technical Manual* (Module 4). Canberra, Australie : Environment Australia. 58 p.
- Avard, K. (2013). *Rôle régional des tourbières sur les eaux souterraines de la partie basse de la zone Bécancour*. (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada. 145 p.
- Avard, K., Larocque, M. et Pellerin, S. (2013). Perturbations des tourbières de la région de Bécancour, Centre-du-Québec, entre 1966 et 2010. *Le Naturaliste canadien*, 137(1), 8-15.
- Ayotte, G. et Rochefort, L. (2019). *Les sphaignes de l'Est du Canada: Clé d'identification visuelle et cartes de répartition*. Montréal, Canada : Éditions JFD. 270 p.
- Barron, O. V., Emelyanova, I., Van Niel, T. G., Pollock, D. et Hodgson, G. (2014). Mapping groundwater-dependent ecosystems using remote sensing measures of vegetation and moisture dynamics. *Hydrological Processes*, 28(2), 372-385.
- Bazoge, A., Lachance, D., Villeneuve, C. Direction de l'expertise en biodiversité et Direction de l'aménagement et des eaux souterraines. (2015). *Identification et délimitation des milieux humides du Québec méridional*. Québec, Canada : Les Publications du Québec. 106 p.
- Biron, P. M., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Choné, G., Cloutier, C. A., Ouellet, M. A., ... et Eyquem, J. (2014). Freedom space for rivers: a sustainable

- management approach to enhance river resilience. *Environmental management*, 54(5), 1056-1073.
- Boulton, A. J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E. H. et Valett, H. M. (1998). The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29(1), 59-81.
- Bourgault, M. A., Larocque, M. et Garneau, M. (2019). How do hydrogeological setting and meteorological conditions influence water table depth and fluctuations in ombrotrophic peatlands? *Journal of Hydrology X*, 4, 100032. doi : [10.1016/j.hydroa.2019.100032](https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100032)
- Brodie, R., Sundaram, B., Tottenham, R., Hostetler, S. et Ransley, T. (2007). *An overview of tools for assessing groundwater-surface water connectivity*. Bureau of Rural Sciences, Canberra, Australia, 131 p.
- Brown, J., Bach, L., Aldous, A., Wyers, A. et DeGagné, J. (2011). Groundwater-dependent ecosystems in Oregon: An assessment of their distribution and associated threats. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(2), 97-102.
- Campbell, D. et L. Rochefort, 2001. La végétation : gradients. Dans: Payette., S. et L. Rochefort (édit.). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador* (p. 129-140). Québec, Canada : Presses de l'Université Laval. 621 p.
- CIC. (2016). *Cartographie détaillée des milieux humides des secteurs habités du sud du Québec - bassin versant de la rivière du Nord (Abrinord) et des territoires municipaux au sud de la région administrative des Laurentides* [Carte]. Récupéré de <http://www.canards.ca/cartographie-detaillee-des-milieux-humides-du-quebec/>
- CIC. (2019). *Cartographie détaillée des milieux humides du territoire de la plaine du Lac-Saint-Jean* [Rapport technique]. Québec, Canada, 54 p.
- Carter, V. (1996). *Wetland hydrology, water quality, and associated functions*. National water summary on wetland resources, vol. 2425. Washington, États-Unis.
- Cawood, P. A. (2005). Terra Australis Orogen: Rodinia breakup and development of the Pacific and Iapetus margins of Gondwana during the Neoproterozoic and Paleozoic. *Earth Science Reviews*, 69(3-4), 249-279.

- CEAEQ. (2001). *Détermination des solides dissous totaux et volatils dans les effluents; Méthode gravimétrique*. MA. 115 – S.D. 1.0. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 9 p.
- CEAEQ. (2015). *Détermination de la conductivité : méthode électrométrique, MA.115 – Cond. 1.1, rév.1*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 9 p.
- Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., ... et Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global environmental change*, 26, 152-158.
- Couillard, L. et Grondin, P. (1986). *La végétation des milieux humides du Québec*. Québec, Canada : Ministère de l'Environnement. 399 p.
- Davidson, N. C. (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(10), 934-941.
- Elango, L. et Kannan, R. (2007). Rock–water interaction and its control on chemical composition of groundwater. *Developments in Environmental Science*, 5, 229-243.
- Ferlatte, M. (2014). *Hydrogéochimie des systèmes aquifère-tourbière et traceurs des processus d'échanges dans deux contextes géo-climatiques du Québec méridional* (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada, 96 p.
- Ferlatte, M., Quillet, A., Larocque, M., Cloutier, V., Pellerin, S. et Paniconi, C. (2015). Aquifer–peatland connectivity in southern Quebec (Canada). *Hydrological Processes*, 29(11), 2600-2612.
- Fournier, V. (2008). *Hydrologie de la tourbière du Mont Covey Hill et implications pour la conservation* (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada, 107 p.
- Freeze, R. A. et Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. Waterloo, Canada, 604 p.

- Furlan, L. M., Rosolen, V., Sales, J., Moreira, C. A., Ferreira, M. E., Bueno, G. T., ... et Mounier, S. (2020). Natural superficial water-storage and aquifer recharge assessment in Brazilian savanna wetland using unmanned aerial vehicle and geophysical survey. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 8(3), 224-244.
- Gilfedder, B. S., Frei, S., Hofmann, H. et Cartwright, I. (2015). Groundwater discharge to wetlands driven by storm and flood events: Quantification using continuous Radon-222 and electrical conductivity measurements and dynamic mass-balance modelling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 165, 161-177.
- Hayashi, M. et Rosenberry, D. O. (2002). Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water. *Groundwater*, 40(3), 309-316.
- Hayashi, M. (2004). Temperature-electrical conductivity relation of water for environmental monitoring and geophysical data inversion. *Environmental monitoring and assessment*, 96(1-3), 119-128.
- Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254)*. Department of the Interior, US Geological Survey. Alexandria, États-Unis, 272 p.
- Hemond, H. F. et Benoit, J. (1988). Cumulative impacts on water quality functions of wetlands. *Environmental Management*, 12(5), 639-653.
- Howard, J. et Merrifield, M. (2010). Mapping groundwater dependent ecosystems in California. *PLoS One*, 5(6), e11249. doi :[10.1371/journal.pone.0011249](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011249)
- Hynes, A. et Rivers, T. (2010). Protracted continental collision—Evidence from the Grenville orogen. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 47(5), 591-620.
- Irvine, D. J., Briggs, M. A., Lautz, L. K., Gordon, R. P., McKenzie, J. M. et Cartwright, I. (2017). Using diurnal temperature signals to infer vertical groundwater-surface water exchange. *Groundwater*, 55(1), 10-26.
- Isokangas, E., Rossi, P. M., Ronkanen, A. K., Marttila, H., Rozanski, K. et Kløve, B. (2017). Quantifying spatial groundwater dependence in peatlands through a distributed isotope mass balance approach. *Water Resources Research*, 53(3), 2524-2541.

- Johnston, C. A. (1991). Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands: effects on surface water quality. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 21(5-6), 491-565.
- Junk, W. J., Brown, M., Campbell, I. C., Finlayson, M., Gopal, B., Ramberg, L. et Warner, B. G. (2006). The comparative biodiversity of seven globally important wetlands: a synthesis. *Aquatic Sciences*, 68(3), 400-414.
- Jutras, S., & Plamondon, A. P. (2020). Fonctions hydrologiques des milieux humides boisés soumis à l'aménagement forestier: une revue de la littérature. *Écoscience*, 1-31.
- Kalbus, E., Reinstorf, F. et Schirmer, M. (2006). Measuring methods for groundwater? surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 873-887.
- Keddy, P. A. (2010). *Wetland ecology: principles and conservation* (2^e éd.). New York, USA, Cambridge University Press. 514 p.
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Boukalova, Z., Ertürk, A., Goldscheider, N., ... et Lundberg, A. (2011). Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends. *Environmental Science et Policy*, 14(7), 770-781.
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., ... et Uvo, C. B. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518, 250-266.
- Kremen, C. (2005). Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology letters*, 8(5), 468-479.
- Lapointe, M., Lavoie, A., Leboeuf, M., Lavoie, A. et Leboeuf, M. (2014). *Plantes de milieux humides et de bord de mer du Québec et des Maritimes*. Waterloo, Québec, Canada : Éditions Michel Quintin. 455 p.
- Larocque, M., Ferlatte, M., Pellerin, S., Cloutier, V., Munger, J.L. Paniconi, C. et Quillet, A. (2016). Chemical and botanical indicators of groundwater inflow to Sphagnum-dominated peatlands. *Ecological Indicators*, 64, 142-151.

- Larocque, M., Gagné, S., Morard, A., Roux, M. (2019). Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines dans la région des Laurentides et de la MRC les Moulins - Rapport phase I. Rapport déposé au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 79 p.
- Levison, J., Larocque, M., Fournier, V., Gagné, S., Pellerin, S. et Ouellet, M.-A. (2014). Dynamics of a headwater system and peatland under current conditions and with climate change. *Hydrological Processes*, 28, 4808-4822.
- Lowry, C. S., Walker, J. F., Hunt, R. J., et Anderson, M. P. (2007). Identifying spatial variability of groundwater discharge in a wetland stream using a distributed temperature sensor. *Water resources research*, 43(10). doi : [10.1029/2007WR006145](https://doi.org/10.1029/2007WR006145)
- McNeil, V. H., et Cox, M. E. (2000). Relationship between conductivity and analysed composition in a large set of natural surface-water samples, Queensland, Australia. *Environmental Geology*, 39(12), 1325-1333.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington DC, USA : Island Press. 159 p.
- MAPAQ. (2001). *Historique des travaux de drainage au Québec et état du réseau hydrographique, document rédigé dans le contexte du colloque régional sur les cours (6211-12-007)*. Sainte-Martine, Québec, Canada: Robert Beaulieu. 9 p.
- MELCC. (2019a). *Cartographie des milieux humides potentiels du Québec—Guide de l'utilisateur—version 2019*. 26 p.
- MELCC. (2019b). *Cartographie des milieux humides potentiels du Québec* [Carte]. Récupéré de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/milieux-humides-potentiels>
- MERN. (2016). Base de données topographiques du Québec (BDTQ) [Carte]. Échelle : 1 : 20 000. Récupéré de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/cartes-topographiques-a-l-echelle-de-1-20-000>
- MERN. (2019). *Géologie du socle* [Carte]. Récupéré de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/geologie-du-socle>

- MERN. (2020a). *Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ)*. [Carte]. Récupéré de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/grhq>
- MERN. (2020b). *Géologie du Quaternaire – Zones morpho-sédimentologiques* [Carte]. Échelle : 1 : 50 000. Récupéré de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/geologie-du-quaternaire>
- MFFP. (2020). *LiDAR – Modèles numériques (terrain, canopée, pente)* [Carte]. Récupéré de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/produits-derives-de-base-du-lidar>
- MRNF. (2005). *Système sur les découpages administratifs* [Carte]. Échelle 1 : 20 000. Récupéré de <https://mern.gouv.qc.ca/repertoire-geographique/couches-decoupages-administratifs/>
- MDDELCC. (2017a). *Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques*. LQ. c. 14. Récupéré de <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/milieux-humides/loi.htm>.
- MDDELCC. (2017b). *Utilisation du territoire* [Carte]. Récupéré de https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/utilisation-du-territoire/resource/b45cc856-d6f9-423e-a92b-ba5f64f726ae?inner_span=True
- MDDELCC. (2017c). *Bassins hydrographiques 20k et 50k niveaux 1 à 8* [Carte]. Échelle 1 : 20 000. Récupéré de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/bassins-hydrographiques-multi-echelles-du-quebec>
- MDDEP. (2009). *Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et favorisant une meilleure gouvernance de l'eau et des milieux associés*. LQ. c. 6.2, art. 15.4. Récupéré de <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cs/c-6.2>
- Mitsch, W. J., Bernal, B., Nahlik, A. M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C. J., ... et Brix, H. (2013). Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28(4), 583-597.
- Mitsch, W. et Gosselink, J. (2015). *Wetlands* (5^e éd.). New Jersey, USA : John Wiley et Sons. 464 p.

- Moomaw, W. R., Chmura, G. L., Davies, G. T., Finlayson, C. M., Middleton, B. A., Natali, S. M., ... et Sutton-Grier, A. E. (2018). Wetlands in a changing climate: science, policy and management. *Wetlands*, 38(2), 183-205.
- Muller, S. D. (2002). Influence de la végétation sur l'accumulation de la tourbe au Québec méridional. *Comptes Rendus Biologies*, 325(5), 629-640.
- Munger, J.L., Pellerin, S., Larocque et M., Ferlatte, M. (2014). Espèces végétales indicatrices des échanges d'eau entre tourbière et aquifère. *Le Naturaliste canadien*, 138(1), 4-12.
- Neff, B. P. et Rosenberry, D. O. (2018). Groundwater connectivity of upland-embedded wetlands in the prairie pothole region. *Wetlands*, 38(1), 51-63.
- Neff, B. P., Rosenberry, D. O., Leibowitz, S. G., Mushet, D. M., Golden, H. E., Rains, M. C., ... et Lane, C. R. (2020). A hydrologic landscapes perspective on groundwater connectivity of depressional wetlands. *Water*, 12(1), 50. doi : [10.3390/w12010050](https://doi.org/10.3390/w12010050)
- Novitzki, R. P., Smith, R. D. et Fretwell, J. D. (1997). *Restoration, creation, and recovery of wetlands: wetland functions, values, and assessment*. Reston, États-Unis, United States Geological Survey Water Supply Paper, vol. 2425. 15p.
- NRC. (1995). *Wetlands: Characteristics and boundaries*. Washington DC, USA : National Academies Press. 328 p.
- NWWG. (1997). *The Canadian wetland classification system* (2^e éd.). Waterloo, Ontario, Canada : Wetland Research Centre Publication. 76 p.
- Paul, M. J. et Meyer, J. L. (2001). Streams in the urban landscape. *Annual review of Ecology and Systematics*, 32(1), 333-365.
- Payette, S. et Rochefort, L. (2001). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Québec, Canada, Presses de l'Université Laval. 621 p.
- Pellerin, S. et Poulin, M. (2013). *Analyse de la situation des milieux humides au Québec et recommandations à des fins de conservation et de gestion durable* [Rapport - Bilan]. Pour le Ministère du Développement durable, de

l'Environnement, de la Faune et des Parcs. Centre de la Science de la Biodiversité du Québec (CSBQ), Montréal, Canada, 104 p.

- Poulin, M., Pellerin, S., Cimon-Morin, J., Lavallée, S., Courchesne, G., et Tendland, Y. (2016). Inefficacy of wetland legislation for conserving Quebec wetlands as revealed by mapping of recent disturbances. *Wetlands Ecology and Management*, 24(6), 651-665.
- Proulx-McInnis, S., St-Hilaire, A., Rousseau, A. N. et Jutras, S. (2013). A review of ground-penetrating radar studies related to peatland stratigraphy with a case study on the determination of peat thickness in a northern boreal fen in Quebec, Canada. *Progress in Physical Geography*, 37(6), 767-786.
- Randour, I., Daigneault, R-A., Lamothe, M., Roy, M. et Robitaille, A. (2019). Cartographie des formations superficielles de la région des Laurentides-Lanaudière, phase 2. Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Québec, Canada, 48 p.
- Randour, I., Daigneault, R-A., Lamothe, M., Roy, M. et Robitaille, A. (2020). Cartographie des formations superficielles de la région des Laurentides-Lanaudière, phase 3. Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Québec, Canada, 49 p.
- Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D., et Clesceri, L. S. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, Washington, DC, États-Unis, 541 p.
- Rivers, T. (2008). Assembly and preservation of lower, mid, and upper orogenic crust in the Grenville Province—Implications for the evolution of large hot long-duration orogens. *Precambrian Research*, 167(3-4), 237-259.
- Rosa, E., Dallaire, P. L., Nadeau, S., Cloutier, V., Veillette, J., van Bellen, S. et Larocque, M. (2018). A graphical approach for documenting peatland hydrodiversity and orienting land management strategies. *Hydrological Processes*, 32(7), 873-890.
- Rosenberry, D. O. et LaBaugh, J. W. (2008). *Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water*. U.S. Reston, États-Unis, Geological Survey Techniques and Methods 4-D2. 128p .

- Rousseau, Y., et Biron, P. M. (2009). Geomorphological Impacts of Channel Straightening in an Agricultural Watershed, Southwestern Québec. *Northeastern Geographer*, 1. doi : [10.1007/s00267-002-2663-1](https://doi.org/10.1007/s00267-002-2663-1)
- R Core Team (2020). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. (ISBN 3-900051-07-0). Vienne, Autriche. 201 p.
- Roux, M. (2019). *Dynamique hydrique de milieux humides temporaires dans la forêt du Québec méridional* (Mémoire de maîtrise). Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada, 156 p.
- Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 118. 012019. doi : [10.1088/1755-1315/118/1/012019](https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019)
- Safeeq, M. et Fares, A. (2016). Groundwater and surface water interactions in relation to natural and anthropogenic environmental changes. Merced, États-Unis, *Emerging Issues in Groundwater Resources*. Springer, Cham. pp. 289-326.
- SIEF. (2018). *Cartographie du 5e inventaire écoforestier du Québec méridional, méthode et données associées* [Carte]. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Secteur des forêt, Direction des inventaires forestiers. Récupéré de <http://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/inventaire-ecoforestier/>
- Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology journal*, 10(1), 52-67.
- Sorensen, J. A. et Glass, G. E. (1987). Ion and temperature dependence of electrical conductance for natural waters. *Analytical Chemistry*, 59(13), 1594-1597.
- Thirumalini, S. et Joseph, K. (2009). Correlation between electrical conductivity and total dissolved solids in natural waters. *Malaysian Journal of Science*, 28(1), 55-61.
- Tiner, R. W. (2016). *Wetland indicators: A guide to wetland formation, identification, delineation, classification, and mapping* (2^e éd.) Boca Raton, USA : Taylor et Francis. 630 p.

- Turner, R. K., Brouwer, R., Georgiou, S. et Bateman, I. J. (2000). *Ecosystem functions and services: an integrated framework and case study for environmental evaluation*. Université d'Est Anglia, Norwich, Angleterre, CSERGE GEC Working Paper. 36 p.
- Walton, N. R. G. (1989). Electrical conductivity and total dissolved solids—what is their precise relationship? *Desalination*, 72(3), 275-292.
- Winter, T. C. (1999). Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, 7(1), 28-45.
- Xintu, L. (2009). Conditions of peat formation. *Coil, oil shale, natural bitumen, heavy oil and peat*, Changchun Institute of Geography, China, vol. 2, 6 p.