

**Méthodes de détermination de la ligne des hautes eaux des cours d'eau en milieu agricole et urbain dans un contexte de changements climatiques**

**Rapport final**

**Par**

**Freddy Houndekindo<sup>1</sup>, Mathieu Vaillancourt<sup>2</sup>, Sophie Duchesne<sup>1</sup>, Monique Poulin<sup>2</sup>,  
André St-Hilaire<sup>1</sup>, Charles Gignac<sup>1</sup>, Normand Bergeron<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup> INRS-ETE**

**<sup>2</sup> Université Laval**

**Avril 2022**

**Référence à citer :**

Houndekindo, F., M. Vaillancourt, S. Duchesne, M. Poulin, A. St-Hilaire, C. Gignac, N.E. Bergeron. 2022. Méthodes de détermination de la ligne des hautes eaux des cours d'eau en milieu agricole et urbain dans un contexte de changements climatiques. Rapport Final. INRS-ETE R2196, v, 46 pages

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2022  
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-925559-01-6-X (version numérique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2025  
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2025

## Table des matières

Liste des Figures.....	iii
Liste des Tableaux.....	iv
Contexte et objectif.....	1
1 Méthode botanique.....	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Méthodologie.....	2
Sélection des sites.....	2
Inventaires.....	6
Diagnostic de végétation.....	8
Positionnement de la LHE.....	12
1.3 Résultats.....	14
1.4 Discussion.....	21
Strates et Inventaires.....	22
Recouvrement et Dominance.....	23
Pondération.....	24
Comparaison avec les autres méthodes.....	25
Autres recommandations.....	26
1.5 Conclusion pour la méthode botanique.....	26
1.6 Analyses supplémentaires.....	27
2 Méthode hydrologique/hydraulique.....	32
2.1 Introduction.....	32
2.2 Méthodologie de l'analyse hydrologique.....	32
2.3 Méthodologie de la modélisation hydraulique.....	35
2.4 Résultats de la méthode hydrologique/hydraulique.....	36
2.4.1 Collecte des données et importation des données dans HEC-RAS.....	36
2.4.2 Résultats de l'analyse régionale.....	37
2.4.3. Résultats de la modélisation hydraulique.....	40
3 Méthode géomatique.....	42
4 Première comparaison entre les méthodes botanique et hydrologique/hydraulique.....	49

## Liste des Figures

Figure 1 Illustration de la démarche de sélection de tronçons. Les longs segments et leur zone tampon circulaire de 100 m de rayon sont représentés en noir sur la carte. Le grossissement, en haut à gauche de la figure, montre un tronçon sélectionné (en rose) ayant plus de 85% de superficies urbanisées dans sa zone tampon. ....	3
Figure 2 Carte de l'emplacement des sites. Les détails sont fournis au tableau 1. ....	5
Figure 3 Graphique d'interaction Type de paysage*Strates. Les barres verticales représentent la plus petite différence significative pour chacun des types de paysage et les lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Tukey. 4 strates : prise en compte de l'ensemble des strates, Herbacées : prise en compte des espèces enracinées au point d'inventaire uniquement (principalement la strate herbacée). ....	16
Figure 4 Graphique d'interaction Type de paysage*Inventaire. Les barres verticales représentent la plus petite différence significative pour chacun des types de paysage et les lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Tukey. Quadrats : inventaires par quadrats, PDC : inventaires par points de contact. ....	17
Figure 5 Graphique d'interaction Strates * Inventaire. Les barres verticales représentent la plus petite différence significative et les lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Tukey. 4 strates : prise en compte de l'ensemble des strates, Herbacées : prise en compte des espèces enracinées au point d'inventaire uniquement (principalement la strate herbacée). Quadrats : inventaires par quadrats, PDC : inventaires par points de contact. ....	18
Figure 6 Graphique d'interaction Type de paysage * Dominance * Recouvrement. Les barres verticales représentent la plus petite différence significative pour chacun des types de paysage et les lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Tukey. P/A : utilisation de données de présence/absence, Rec : utilisation des données de recouvrement. Toutes sp. : toutes les espèces sont utilisées pour le diagnostic de végétation, Dominantes : seules les espèces dominantes sont utilisées pour le diagnostic de végétation. ....	19
Figure 7 Graphique de l'effet du facteur Pondération. Les barres verticales représentent la plus petite différence significative et les lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Tukey. Officielle : pondération classant les espèces selon qu'elles sont indicatrices ou non, Officielle avec OBL x2 : pondération officielle modifiée pour doubler le poids des espèces OBL. 1-2-4 : pondération à trois niveaux selon le statut hydrique (OBL, FACH, NI), seuil à 3.0, 1-2-3-4-5 : pondération à cinq niveaux selon le statut hydrique (OBL, FACH, FAC, FACT, TER), seuil à 3.0. ....	20
Figure 8 Comparaison des hauteurs de LHE obtenues avec la méthode officielle, la méthode de l'indice de prévalence (IP), la méthode du ratio de dominance (RD) et la méthode de l'indice de couverture hydrophytique (ICH). Les losanges représentent la hauteur moyenne de la LHE. Les lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Tukey. ....	25
Figure 9 Élévation relative des groupes d'espèces retrouvés en paysage forestier. ....	29
Figure 10 Élévation relative des groupes d'espèces retrouvés en paysage agricole. ....	30
Figure 11 Élévation relative des groupes d'espèces retrouvées en paysage urbain. ....	31
Figure 12. Localisation des rivières incluses dans la présente étude. ....	37
Figure 13. Régions homogènes définies pour l'analyse fréquentielle régionale. ....	38

Figure 14. Diagrammes en boîte montrant la distribution des variables explicatives pour chaque région.....	38
Figure 15. Quantiles estimés à chaque station, en ordre croissant. ....	39
Figure 16. Comparaison des niveaux simulés et observés à toutes les sections échantillonnées. ...	40
Figure 17. Erreur relative entre les niveaux observés et simulés en fonction du débit mesuré pour a) les sites avec des débits mesurés inférieurs à 0.15 m <sup>3</sup> /s et b) les sites avec des débits mesurés supérieurs à 0.15 m <sup>3</sup> /s.....	42
Figure 18 : Structure élémentaire pour la détection du niveau plein-bord à chaque transect. (En bleu : le talweg, en rouge : un transect de 200 m, en jaune : les points du transect espacés chacun de 1 m).....	44
Figure 19 : Détection du niveau d'eau correspondant à l'inversion du RLP (donc du débordement) .....	44
Figure 20 : Report du niveau d'eau détecté comme plein-bord sur le profil transversal correspondant .....	45
Figure 21 : Squelette de la LHE avec une $\alpha$ -shape l'entourant. (Les points noirs correspondent aux niveaux LHE hydrauliques).....	47
Figure 22 : Écarts entre les élévations correspondantes aux LHE mesurées par les méthodes géomatiques (G), hydrauliques (H) et botaniques (trait noir). (N.B. La valeur de référence utilisée pour la comparaison est, par convention, la méthode botanique).....	48
Figure 23. Distance relative entre le niveau associé à la crue de récurrence 2 ans, les intervalles de confiance à 95% et la méthode botanique pour les tronçons en milieu forestier.....	51
Figure 24. Distance relative entre le niveau associé à la crue de récurrence 2 ans, les intervalles de confiance à 95% et la méthode botanique pour les tronçons en milieu agricole. ....	51
Figure 25. Distance relative entre le niveau associé à la crue de récurrence 2 ans, les intervalles de confiance à 95% et la méthode botanique pour les tronçons en milieu urbain.....	51

## Liste des Tableaux

Tableau 1 Liste des 30 sites inventoriés en 2020 et 2021. Leur position est présentée à la figure 2.
Tableau 2 Liste des 64 méthodes de délimitation testées, pour chacune des modifications proposées. Divisions horizontales : méthode d'inventaire, strates, dominance, recouvrement. Divisions verticales : pondération. Les méthodes correspondant à la méthode officielle (Off.) ou aux méthodes alternatives décrites dans la littérature (ICH, IP, RD) sont présentées en gras.
Tableau 3 Résultats de l'ANOVA présentant les effets simples et les interactions doubles et triples (les interactions quadruples, quintuples et sextuples ne sont pas présentées car elles ne sont pas ressorties comme étant significatives). Les lignes en gras représentent les termes significatifs à $\alpha = 0,01$ .
Tableau 4 Liste des espèces indicatrices pour les groupes d'espèces confinés sous la LHE ou pour les groupes d'espèces ayant une large répartition de part et d'autre de la LHE en paysage forestier (Figure 9). Le numéro du groupe associé à l'espèce est indiqué entre parenthèses.
Tableau 5 Liste des espèces indicatrices pour les groupes d'espèces confinés sous ou au-dessus de la LHE, ou pour les groupes d'espèces ayant une large répartition de part et d'autre de la LHE en paysage agricole (Figure 10).
Tableau 6 Liste des espèces indicatrices pour les groupes d'espèces confinés sous la LHE ou pour les groupes d'espèces ayant une large répartition de part et d'autre de la LHE en paysage urbain (Figure 11).
Tableau 7. Régions homogènes définies par l'ACC et nombre de stations.

Tableau 8 Résultats de la validation croisée pour les deux méthodes d'estimation des crues  
Tableau 9 : Exemple simple de suivi du RLP et de la détermination du niveau plein-bord. (N.B. L'épaisseur de la lame d'eau cumulée débute à la surface de l'eau, au moment de l'acquisition des données LiDAR et ne doit pas être assimilée à une profondeur d'eau.

## Contexte et objectif

Le ministère de l'Environnement de la Lutte aux Changements Climatiques (MELCC) a demandé à un groupe pluridisciplinaire de chercheurs de l'INRS et de l'Université Laval de compléter une analyse comparative de différentes méthodes de détermination de la ligne des hautes eaux (LHE) dans les contextes anthropiques urbanisés et agricoles.

Trois types d'approches sont comparés dans le cadre de ce projet : les méthodes botaniques, hydraulique et géomatiques/géomorphologique. Ce rapport final présente les méthodologies de chacune des approches et les résultats des analyses.

## 1 Méthode botanique

### 1.1 Introduction

La méthode de délimitation officielle pour la délimitation de la ligne des hautes eaux (LHE), telle que promue par le MELCC, est la méthode botanique dite «experte», qui vise à identifier l'emplacement de la LHE naturelle, soit celle qui correspond à la transition d'une végétation hygrophile à une végétation terrestre. L'objectif pour le volet botanique est de tester cette méthode en la comparant à des méthodes alternatives et ce, pour des milieux riverains situés en paysages forestiers, agricoles et urbains. L'application de la méthode botanique officielle avait été évaluée pour les plans d'eau et les rivières dans un rapport de Gilbert (1995), en comparant la LHE obtenue avec l'emplacement de la ligne de récurrence de crue 0-2 ans. L'auteure avait conclu qu'il y avait une concordance entre la LHE botanique et la récurrence de crue 0-2 ans, mais le nombre de sites échantillonnés était limité ( $n = 12$ ).

Nous avons pour le volet de cette étude voulu tester à plus grande échelle et de façon plus systématique l'utilisation de la méthode botanique officielle, telle que décrite, pour en proposer des modifications. Notamment, certains aspects de la méthode sont laissés à la discrétion de l'expert-e qui réalise la méthode, comme la superficie à inventorier, largeur du transect à positionner ou encore la longueur des segments qui seront inventoriés. Comme ce sont des facteurs qui pourraient influencer le positionnement de la LHE, nous les avons testés afin de réduire l'effet observateur. D'autres modifications sont proposées en vue d'améliorer la méthode, soit en la rendant plus rapide à réaliser ou en éliminant des sources d'erreur. Ces modifications de la méthode officielle ont toutes été testées dans un plan d'analyses systématique afin de connaître leur effet sur le positionnement de la LHE et valider leur pertinence.

Les méthodes les plus communes pour délimiter la LHE ont été recensées par Lapointe et Jutras (2021). Celles-ci incluent des méthodes basées sur les espèces dominantes (méthode du ratio de dominance; RD), des méthodes basées sur la prévalence des espèces de milieux humides (méthode de l'indice de prévalence; IP) ou encore sur le recouvrement des espèces considérées indicatrices (méthode de l'indice du couvert hydrophytique; ICH). Ces méthodes alternatives ont également été utilisées afin d'évaluer la méthode officielle du MELCC.

Nos constats sont les suivants:

- La méthode officielle diffère en plusieurs points des méthodes existantes, notamment celles utilisées aux États-Unis; elle présente des incohérences et des éléments ouverts à l'interprétation.
- Plusieurs modifications peuvent être apportées à la méthode afin de l'améliorer.
- Les améliorations à la méthode font remonter la hauteur moyenne de la LHE des transects inventoriés, ce qui semble indiquer que la méthode officielle sous-estime la hauteur de la LHE naturelle.
- Parmi les modifications proposées, trois ont un effet particulièrement marqué. Les deux premières concernent les inventaires et consistent d'abord à ne pas considérer les espèces présentes dans la canopée, puis à omettre des inventaires les espèces herbacées ayant un couvert très faible. La troisième modification consiste à classer les espèces facultatives (FAC) comme des espèces neutres lors du diagnostic de végétation.
- Une mise à jour de la liste d'espèces de milieux humides pour le sud du Québec est recommandée.

## 1.2 Méthodologie

### Sélection des sites

Nous avons sélectionné dix sites correspondant à trois types de paysage, soit forestiers, agricoles et urbains, les sites en paysage forestier servant de référence. Un site représentait un tronçon de rivière d'environ 100 m de longueur.

De longs segments de rivière de plusieurs kilomètres ont d'abord été sélectionnés à partir d'un fichier de forme (*shapefile*), pour des rivières dont la ligne des hautes eaux (LHE) avait déjà été modélisée par le MDDELCC (2018). Chaque segment modélisé était ensuite converti en une série de points espacés de 20 m permettant de délimiter des zones tampons circulaires de 100 m de rayon. Il a ainsi été possible de faire une analyse de paysage indépendante pour chaque rive des segments modélisés, en tenant compte des superficies boisées (fichier provenant de la Base des données

topographiques du Québec), des superficies agricoles (fichier provenant de la Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées), et des superficies urbanisées (fichier provenant de DMTI Spatial). Cela nous a permis de décrire les segments et de pouvoir par la suite sélectionner un tronçon uniforme au sein de ceux-ci. Nous avons sélectionné 20 tronçons pour chaque type de paysage, en sélectionnant ceux qui étaient le plus homogène possible; ainsi, chaque tronçon sélectionné était caractérisé par un paysage où un minimum de 85% de la superficie était soit en forêt, en terres agricoles ou en surfaces urbanisées. Le seuil de 85% a été retenu puisqu'il permettait d'obtenir un nombre suffisant de sites dans chaque type et de bien discriminer les trois types de paysages. La démarche est illustrée à la Figure 1.

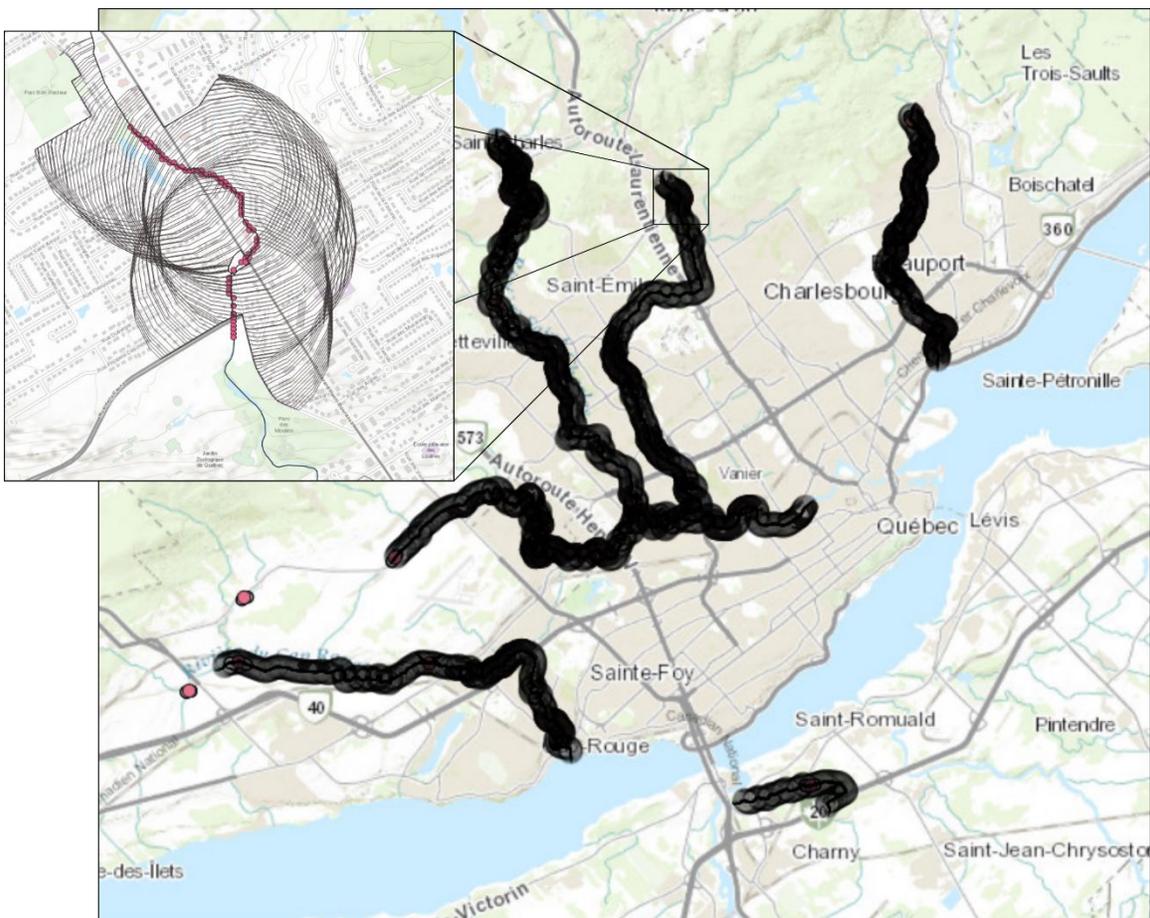


Figure 1 Illustration de la démarche de sélection de tronçons. Les longs segments et leur zone tampon circulaire de 100 m de rayon sont représentés en noir sur la carte. Le grossissement, en haut à gauche de la figure, montre un tronçon sélectionné (en rose) ayant plus de 85% de superficies urbanisées dans sa zone tampon.

Cette sélection de tronçons par analyse spatiale a par la suite été validée par une analyse visuelle des cartes satellites pour prendre en compte les changements plus récents dans l'occupation du territoire. Puis, la sélection a été raffinée selon différents critères. Les deux rives opposées devaient correspondre au même type de paysage afin que celui-ci soit le plus uniforme possible. Les

tronçons en paysage urbain et en paysage agricole devaient avoir une bande riveraine végétalisée assez large, afin que la LHE modélisée soit comprise dans la zone de végétation. Les tronçons urbains et agricoles ne devaient pas présenter d'ouvrage de stabilisation des berges tel qu'un mur de soutènement ou un enrochement. L'amont des tronçons choisis devait être caractérisé le plus possible (en longueur et en proportion de la zone tampon) par le même type de paysage, considérant que les patrons de biodiversité sont structurés non seulement par les dimensions latérales et verticales du cours d'eau, mais également par la dimension longitudinale (Naiman et al., 2005; Bourgeois et al., 2016). Pour cette même raison, un maximum d'un tronçon par type de paysage a été sélectionné par rivière, pour éviter l'autocorrélation spatiale.

La sélection initiale a été complétée par une sélection de cours d'eau non modélisés. Pour ce faire, des rivières situées à proximité de Québec ont été choisies à l'aide de Google Earth. Les tronçons ainsi sélectionnés ont ensuite été filtrés selon la possibilité d'en faire une modélisation hydraulique.

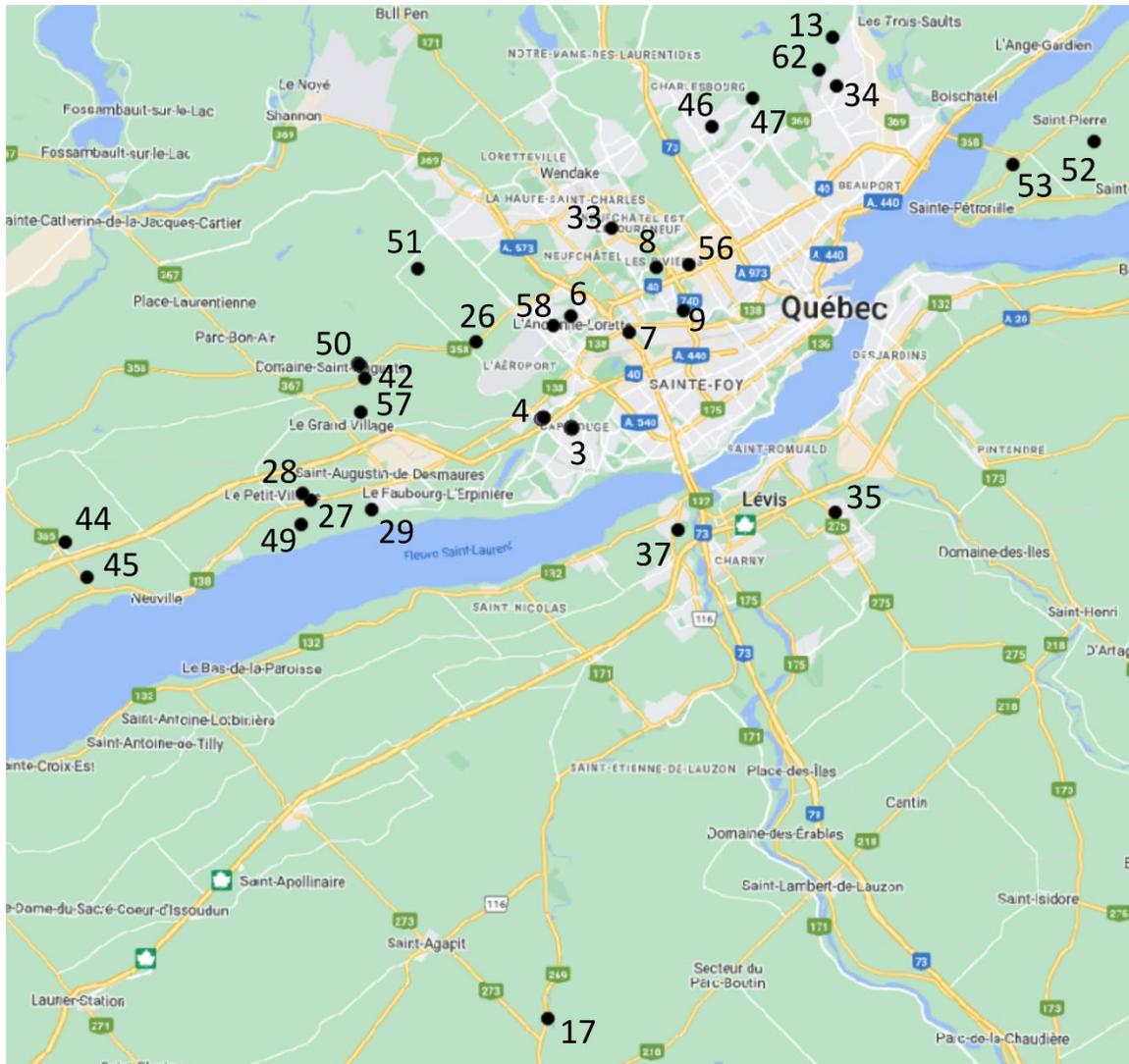


Figure 2 Carte de l'emplacement des sites. Les détails sont fournis au tableau 1.

À la suite de ces étapes, les tronçons obtenus ont été visités afin de confirmer la présence d'un couvert végétatif suffisant, l'absence d'ouvrage de rétention et l'absence de zones d'érosion trop importantes. Lorsque ces conditions étaient rencontrées, un site d'inventaire était positionné sur le tronçon, à l'endroit le mieux végétalisé et afin de capturer une diversité maximale de communautés, à la fois au sein d'un transect (diversité dans le gradient latéral au cours d'eau) et d'un transect à l'autre (diversité le long du cours d'eau). À la fin des deux saisons de terrain (2020 et 2021), dix tronçons par type de paysage ont pu être inventoriés pour un total de 30 sites (tableau 1). Cette sélection finale comprend des rivières de diverses largeurs (3-35 m mesuré à la LHE) réparties dans les MRC de l'Île d'Orléans, Lévis, Lotbinière, Portneuf et Québec (Figure 2). Le site 17, situé en Lotbinière, a été ajouté, bien qu'il se trouve plus éloigné des autres, afin d'inclure une rivière plus

large dans le type de paysage agricole, qui autrement ne contenait que des petits cours d'eau de 10 m ou moins.

Tableau 1 Liste des 30 sites inventoriés en 2020 et 2021. Leur position est présentée à la figure 2.

Site	MRC	Rivière	Type	Modélisée MDDELCC?
3	Québec	Cap-Rouge	Urbain	Oui
4	Québec	Cap-Rouge	Forêt	Oui
6	Québec	Lorette	Forêt	Oui
7	Québec	Lorette	Urbain	Oui
8	Québec	du Berger	Forêt	Oui
9	Québec	du Berger	Urbain	Oui
13	Québec	Beauport	Forêt	Oui
17	Lotbinière	Beaurivage	Agricole	Oui
26	Québec	Lorette	Agricole	Non
27	Québec	Jaune (Ruisseau)	Agricole	Non
28	Québec	des Roches	Agricole	Non
29	Québec	Charland	Agricole	Non
33	Québec	Beaudoin	Urbain	Non
34	Québec	Beauport	Urbain	Oui
35	Lévis	(Saint-Jean-Chrysostome)	Urbain	Non
37	Lévis	Terrebonne (Ruisseau)	Urbain	Non
42	Québec	d'Eau Claire	Agricole	Non
44	Portneuf	Noire	Agricole	Non
45	Portneuf	à Matte	Agricole	Non
46	Québec	des Commissaires	Urbain	Oui
47	Québec	des Commissaires	Forêt	Oui
49	Québec	des Roches	Forêt	Non
50	Québec	d'Eau Claire	Forêt	Non
51	Québec	(Val-Bélair)	Forêt	Non
52	Île d'Orléans	La Grande	Forêt	Non
53	Île d'Orléans	La Grande	Agricole	Non
56	Québec	des Carrières	Urbain	Non
57	Québec	Cap-Rouge	Agricole	Non
58	Québec	Notre-Dame (Ruisseau)	Forêt	Non
62	Québec	(Beauport)	Forêt	Non

#### Inventaires

À chaque site sélectionné, trois transects étaient placés à l'intérieur du tronçon choisi, en les espaçant le plus possible les uns des autres (jusqu'à un maximum de 50 m) et en s'assurant qu'il n'y ait aucune arrivée d'eau (drain, tributaire) entre ceux-ci. Au total, 89 transects ont pu être

réalisés (deux transects seulement ont été réalisés à un site où l'invasissement par *Reynoutria japonica* rendait les inventaires difficiles à réaliser (site 7).

La méthodologie d'inventaire s'est basée sur la méthode officielle, la méthode botanique «experte», telle que décrite dans les notes explicatives du MDDELCC (2015). La première étape de la méthode officielle consiste à positionner un transect perpendiculaire à la rive, qui dépasse la LHE. Ce transect est une ligne imaginaire d'une largeur de 0 à 1 m qui sera par la suite divisée en segments de longueur homogène. Il est à noter que la largeur du transect et la longueur des segments est laissée à la discrétion de la personne réalisant l'inventaire en fonction de la complexité du milieu. Par la suite, chaque segment doit être inventorié, c'est-à-dire que la présence de toutes les espèces situées le long du segment de transect, «tant au-dessus qu'en dessous» est notée (MDDELCC, 2015). Cela inclut donc les espèces surplombant le segment de transect. Il est indiqué que l'observateur peut noter le recouvrement des espèces, la strate dont elles font partie et la microtopographie du transect, mais il n'y a aucune indication sur comment utiliser ces données.

Dans le cadre de la présente étude, les transects étaient d'abord placés sur la rive, dans une section bien végétalisée. La base du transect commençait à la limite inférieure de la végétation herbacée et se terminait là où la végétation était clairement terrestre. Ainsi, la limite supérieure pouvait correspondre au replat (en zone agricole), à une élévation dépassant le niveau plein-bord lorsque celui-ci était visible, ou encore à une élévation caractérisée par une communauté végétale de milieu terrestre, qui soit distincte du reste de la berge. Un ruban était tiré et placé à plat sur le sol afin de suivre la topographie de la berge. Des drapeaux étaient placés à tous les mètres le long du transect et les inventaires pouvaient ensuite être réalisés. Deux méthodes d'inventaires ont été suivies pour chacun des transects.

La première méthode était un inventaire par quadrats. Afin d'être conforme à la méthode, ceux-ci avaient un côté de 1 m de longueur, correspondant à la largeur du transect, et un côté de 0,5 m de longueur, correspondant à la longueur des segments, tels que définis dans la méthode officielle. Un maximum de huit quadrats étaient faits par transect : lorsque celui-ci faisait 4 m ou moins de longueur, les quadrats étaient alors placés de façon contiguë du début à la fin du transect et pouvaient alors être en nombre restreint (un minimum de 3 quadrats pour les transects les plus courts, soit de 1,5 m). Lorsque le transect avait une longueur supérieure à 4 m, les quadrats étaient alors espacés de façon à peu près régulière, afin de couvrir l'ensemble du transect et de façon à bien représenter les différentes communautés. Pour chaque quadrat, le recouvrement des espèces était

noté par classe (Bonham, 1989), ainsi que leur appartenance à la strate herbacée, arbustive, arborée, ou aux lianes dans le cas d'espèces grimpantes comme *Vitis riparia*, *Echinocystis lobata*, etc.

La deuxième méthode était un inventaire par points de contact (PDC). À tous les 50 cm le long du même transect, six points d'inventaire étaient réalisés sur une largeur de 1 m (à 20 cm d'espacement). Lorsque la longueur du transect dépassait les 20 m, les portions homogènes du transect étaient inventoriées à tous les 1 m. Toutes les espèces situées au-dessus ou au-dessous d'un point étaient relevées. Pour chaque position le long du transect, les espèces ainsi que leur nombre d'occurrences étaient notés, ainsi que leur appartenance à la strate herbacée, arbustive arborée, ou aux lianes. La mention des lianes est cependant omise dans le reste du texte puisque leur importance est limitée.

#### Diagnostic de végétation

Après avoir réalisé les inventaires, un diagnostic de végétation était fait pour chaque position le long du transect, afin de déterminer si la végétation est hygrophile (caractéristique des milieux humides) ou terrestre. Selon la méthode officielle, il s'agit de faire à partir de l'ensemble des espèces inventoriées, toutes strates confondues, la proportion d'espèces obligées de milieux humides (OBL) et facultatives de milieux humides (FACH), sans tenir compte de leur recouvrement. Une liste de ces espèces est fournie en annexe de la méthode (MDDELCC, 2015). Lorsque la végétation avait une proportion d'espèces de milieux humides supérieure ou égale à 50 %, celle-ci est classée hygrophile, alors qu'elle est classée terrestre dans le cas contraire.

Pour cette étude, le diagnostic de végétation (végétation hygrophile ou non) a d'abord été réalisé à l'aide du calcul prescrit par la méthode officielle pour chacun des deux inventaires décrits précédemment. Le diagnostic a ensuite été refait en apportant différentes modifications à cette méthode. Cinq modifications à la méthode officielle ont été testées. La méthode d'inventaire qui a été décrite précédemment constituait la première modification (points de contact), à quoi s'ajoute : la prise en compte des différentes strates de végétation, l'utilisation du calcul de dominance pour sélectionner les espèces à prendre en compte, la prise en compte du recouvrement des espèces dans le calcul et enfin la pondération utilisée pour le diagnostic de végétation.

La deuxième modification consistait à considérer uniquement la strate herbacée, ainsi que les espèces d'arbustes enracinées à l'emplacement du point d'inventaire. Pour alléger le texte, nous utiliserons simplement le terme «herbacées» pour désigner cet ensemble d'espèces (herbacées et autres espèces enracinées au point d'inventaire). Nous avons ainsi refait les deux diagnostics de

végétation réalisés (quadrats et PDC), cette fois en ne tenant compte que des herbacées, ignorant ainsi tout arbuste, arbre ou liane surplombant le quadrat ou les points de contact.

La troisième modification consistait à utiliser le calcul des espèces dominantes, tel que décrit dans le guide d'identification des milieux humides du ministère (Lachance et al., 2021). Nous avons refait les quatre diagnostics de végétation (Quadrats/PDC; Herbacées/4 strates), cette fois en ne considérant que les espèces dominantes. Les espèces dominantes sont considérées pour toutes les strates ayant plus de 10 % de couvert végétal absolu. Elles incluent, pour chacune des strates, l'ensemble des espèces dont le recouvrement relatif individuel est supérieur à 20%, ainsi que l'ensemble des espèces dont le recouvrement relatif combiné dépasse 50%.

La quatrième modification consistait à prendre en compte le recouvrement des espèces. Dans la méthode officielle, toutes les espèces ont le même poids, qu'elles soient présentes à l'état de trace ou qu'elles recouvrent l'ensemble du quadrat. Nous avons donc refait les huit diagnostics précédents, cette fois en pondérant chaque espèce à l'aide de son recouvrement absolu.

Enfin, la cinquième modification consistait à pondérer différemment les espèces selon leurs statuts hydriques. Au total, quatre méthodes de pondération différentes ont été utilisées pour les 16 diagnostics décrits précédemment. Selon la pondération officielle, on classe simplement les espèces selon qu'elles sont indicatrices (OBL et FACH) ou non indicatrices (espèces facultatives (FAC), facultatives terrestres (FACT) et terrestres (TER)). Afin de pouvoir illustrer les modifications proposées, nous représentons le calcul de la méthode officielle de la façon suivante :

*Équation 1*

$$\frac{1 \times OBL + 1 \times FACH + 0 \times FAC + 0 \times FACT + 0 \times TER}{OBL + FACH + FAC + FACT + TER}$$

OBL, FACH, FAC, FACT et TER représentent le nombre d'espèces ou la somme des recouvrements d'espèces correspondant à chaque statut hydrique. Le seuil utilisé ici pour considérer que la végétation est hygrophile est de  $\geq 0,5$  (donc lorsque le nombre ou le recouvrement relatif des espèces OBL ou FACH est de 50% ou plus). Nous avons réalisé trois autres calculs en modifiant cette équation de base.

La première modification consistait à utiliser la méthode officielle en doublant le poids des espèces OBL (équivalent de doubler leur nombre ou leur recouvrement), sans modifier le seuil. L'équation correspondante est la suivante :

Équation 2

$$\frac{2 \times OBL + 1 \times FACH + 0 \times FAC + 0 \times FACT + 0 \times TER}{2 \times OBL + FACH + FAC + FACT + TER}$$

Nous avons également voulu tester la pondération plus fine utilisée dans le calcul de l'indice de prévalence, qui attribue un score de 1 à 5, des espèces OBL aux espèces TER. Cependant, telle qu'elle est décrite, il est nécessaire pour faire cette analyse d'avoir le statut hydrique précis de chaque espèce. Le classement officiel du Ministère distingue les espèces OBL des FACH, mais considère toutes les autres espèces dans la catégorie non indicatrice (NI). Nous avons donc réalisé le calcul en attribuant à ces espèces le score médian de la catégorie, soit 4. L'équation à trois niveaux (1-2-4) est la suivante :

Équation 3

$$\frac{1 \times OBL + 2 \times FACH + 4 \times (FAC + FACT + TER)}{OBL + FACH + FAC + FACT + TER}$$

Pour ce type de pondération, le seuil utilisé pour considérer que la végétation est hygrophile est de  $\leq 3$  (importance plus grande des espèces OBL et FACH versus FACT et TER). Par exemple, si une espèce de chaque catégorie est présente dans un quadrat à cinq espèces (et qu'on ne considère pas les recouvrements), le résultat de l'équation est 3, ce qui signifie qu'il n'y a pas de prévalence des espèces de milieux humides (OBL, FACH) sur les espèces de milieux terrestres (FACT, TER). Cela représente une différence considérable avec les deux calculs précédents, puisque cela implique de considérer les espèces FAC comme étant neutres, alors qu'elles sont considérées comme non-indicatrices dans la méthode officielle. Il n'était pas possible de rendre cette équation compatible avec le choix de considérer les espèces FAC comme non indicatrices, puisque le fait de changer le seuil utilisé a comme conséquence de déséquilibrer l'importance d'une catégorie d'espèces par rapport à une autre. En déplaçant le seuil à 2.5 pour le situer entre les espèces FACH (score de 2) et FAC (score de 3), il faudrait 1,6 fois plus d'espèces OBL que de TER pour obtenir un diagnostic hygrophile, alors qu'en théorie ces deux catégories devraient avoir le même poids).

Enfin, pour pallier le manque d'information concernant le statut hydrique des espèces au Québec, nous avons également réalisé le calcul en utilisant les données disponibles aux États-Unis<sup>1</sup> pour classer nos espèces de OBL à TER en cinq catégories. Cela nous a permis d'utiliser la formule standard à cinq niveaux (1-2-3-4-5) pour la méthode de l'indice de prévalence :

---

<sup>1</sup> National Wetland Plant List (Lichvar et al. 2014).

Équation 4

$$\frac{1 \times OBL + 2 \times FACH + 3 \times FAC + 4 \times FACT + 5 \times TER}{OBL + FACH + FAC + FACT + TER}$$

Pour cette méthode également, le seuil utilisé pour considérer que la végétation est hygrophile est de  $\leq 3$ .

En résumé, les quatre pondérations utilisées sont la pondération «officielle», la pondération «officielle avec OBL x2», la pondération à trois niveaux «1-2-4» et la pondération à cinq niveaux «1-2-3-4-5».

Avec l'ensemble des modifications proposées, nous avons obtenu 64 méthodes différentes pour effectuer les diagnostics de végétation, c'est-à-dire que chaque modification a été testée systématiquement, en combinaison avec l'ensemble des autres modifications proposées. Afin de bien représenter les 64 méthodes, celles-ci sont présentées au tableau 2.

Tableau 2 Liste des 64 méthodes de délimitation testées, pour chacune des modifications proposées. Divisions horizontales : méthode d'inventaire, strates, dominance, recouvrement. Divisions verticales : pondération. Les méthodes correspondant à la méthode officielle (Off.) ou aux méthodes alternatives décrites dans la littérature (ICH, IP, RD) sont présentées en gras.

				Officielle	Off. OBL x2	1-2-4	1-2-3-4-5
Q	4	Toutes espèces	Prés./Absence	1 (Off. <sup>1</sup> )	2	3	4
			Recouvrement	5 (ICH <sup>2</sup> )	6	7	8 (IP <sup>1</sup> )
		Espèces dom.	Prés./Absence	9 (RD <sup>2</sup> )	10	11	12
			Recouvrement	13	14	15	16
	H	Toutes espèces	Prés./Absence	17	18	19	20
			Recouvrement	21	22	23	24
		Espèces dom.	Prés./Absence	25	26	27	28
			Recouvrement	29	30	31	32
P	4	Toutes espèces	Prés./Absence	33	34	35	36
			Recouvrement	37	38	39	40
		Espèces dom.	Prés./Absence	41	42	43	44
			Recouvrement	45	46	47	48
	H	Toutes espèces	Prés./Absence	49	50	51	52
			Recouvrement	53	54	55	56
		Espèces dom.	Prés./Absence	57	58	59	60
			Recouvrement	61	62	63	64

Q: Quadrats, P: Points de contact, 4: Quatre strates, H: Herbacées.

1 Les méthodes 1 et 8 correspondent aux méthodes officielles et IP.

2 Les méthodes 5 et 9 correspondent aux méthodes ICH et RD pour les cinq paramètres présentés (méthode d'inventaire, strates, dominance, recouvrement et pondération), à la différence que nous avons classé les espèces FAC comme non indicatrices pour les besoins de la comparaison avec la méthode officielle.

#### Positionnement de la LHE

La LHE pouvait par la suite être positionnée à la transition entre la végétation hygrophile et la végétation terrestre. La ligne était placée précisément à mi-chemin entre l'inventaire hygrophile le plus élevé et l'inventaire terrestre situé directement au-dessus. Lorsque cette transition était observée plus d'une fois sur un même transect, seule la transition la plus élevée<sup>2</sup> était retenue. Si aucune transition n'était observée, la LHE était alors placée à une extrémité ou l'autre du transect : si l'ensemble de la végétation du transect était classée hygrophile, la LHE était placée tout en haut, et si au contraire elle était classée terrestre, la LHE était placée au plus bas.

<sup>2</sup> On suppose que le caractère hygrophile de la végétation est attribuable à la rivière. Un quadrat terrestre situé plus bas qu'un quadrat humide serait une aberration qui pourrait être due à plusieurs facteurs.

Parmi les 64 méthodes de délimitation ainsi testées, la méthode officielle du Ministère correspond à la méthode 1 (tableau 2). D'autres correspondent essentiellement à des méthodes existantes, telles que décrites dans Lichvar et Gillrich (2014). La méthode de l'indice de prévalence (IP) correspond à la méthode 8. La méthode du ratio de dominance (RD) correspond à peu près à la méthode 9, à la différence près que la méthode officielle demande de considérer les espèces FAC comme des espèces indicatrices. La méthode de l'indice de couverture hydrophytique (ICH) correspond à peu près à la méthode 5, mais là encore, les espèces FAC devraient normalement être considérées comme des espèces indicatrices.

Les 64 méthodes de délimitation ont ainsi été appliquées aux 89 transects réalisés. Sur l'ensemble des calculs réalisés, seule une faible proportion de délimitations ont été impossibles à positionner (<1 %), spécifiquement lorsque le recouvrement de la végétation n'était pas suffisant pour positionner la LHE à partir du calcul des espèces dominantes.

Le jeu de données obtenu a été utilisé pour analyser l'effet de chacune des modifications sur la hauteur de la LHE. Il est attendu que les modifications ayant une pertinence écologique modifient la hauteur de la LHE. Pour ce faire, les élévations de LHE obtenues pour chaque transect ont été converties en élévations relatives, par différence avec l'élévation du point 0 de chaque transect. Le fait de travailler avec les élévations relatives (composante Z) plutôt qu'avec la longueur de berge ou la distance horizontale (composantes X et Y) a permis de combiner les sites ayant une pente faible et ceux ayant une pente élevée. Pour chacun des transects, les valeurs de LHE manquantes (NA) ont été imputées en attribuant une valeur aléatoire située entre les valeurs minimales et maximales obtenues par l'ensemble des autres méthodes. Le jeu de données ainsi complété compte 5 696 LHE. Une transformation racine carrée a été appliquée sur les données à la suite d'un test de Box-Cox (Box et Cox, 1964). Une ANOVA factorielle à six facteurs a par la suite été réalisée. Le premier facteur correspondait au type de paysage (Type (3 niveaux); paysages forestiers, agricoles ou urbains). Les cinq autres facteurs correspondaient aux modifications de la méthode officielle. Ces modifications incluent : la méthodologie d'inventaire (Inventaire; quadrats ou points de contact), les strates considérées (Strates (2 niveaux); l'ensemble des quatre strates ou seules les herbacées), les espèces considérées (Dominance (2 niveaux); l'ensemble des espèces ou seules les dominantes), la prise en compte du recouvrement (Recouvrement (2 niveaux); présence/absence ou recouvrement) et la pondération et méthode de calcul (Pondération (4 niveaux); officielle, officielle avec OBL x2, trois niveaux 1-2-4, cinq niveaux 1-2-3-4-5). Ces six facteurs (le type de paysage et les cinq modifications à la méthode officielle) ont été considérés comme des effets fixes, alors que le transect a été considéré comme un facteur aléatoire, niché dans le facteur site, lui-même considéré

aléatoire. Les effets simples et interactions ont été considérés significatifs à  $\alpha = 0,01$ . Des graphiques ont été produits pour les effets simples et interactions les plus élevées pour chaque facteur.

Après cette analyse détaillée des différentes méthodes, nous avons comparé la méthode officielle avec les méthodes citées dans Lapointe et Jutras (2021). La méthode de l'indice de prévalence (IP) a déjà été décrite et correspond à la méthode 8 du tableau 1. Elle tient compte des recouvrements et applique une pondération à cinq niveaux pour les cinq catégories de plantes de OBL à TER. La méthode du ratio de dominance (RD) consiste d'abord à identifier les espèces dominantes à partir des inventaires détaillés. Pour que le diagnostic soit hygrophile, le nombre d'espèces indicatrices doit être de plus de la moitié du nombre total d'espèces dominantes ( $> 50\%$ ), sans égard à leur recouvrement. Les espèces OBL, FACH et FAC sont considérées comme des espèces indicatrices. La méthode RD est analogue à la méthode 9 du tableau 1. Enfin, l'indice de couverture hydrophytique (ICH) consiste à faire la somme des recouvrements des espèces indicatrices et de la diviser par la somme totale des recouvrements des espèces inventoriées. Pour que le diagnostic soit hydrophile, le recouvrement d'espèces indicatrices doit être égal ou supérieur à la moitié du recouvrement total de la strate ( $\geq 50\%$ ). Ici aussi, les espèces OBL, FACH et FAC sont considérées comme des espèces indicatrices. La méthode ICH est analogue à la méthode 5 du tableau 1. Pour réaliser ces trois méthodes, nous nous sommes basés sur les inventaires par quadrats ne tenant compte que de la strate herbacée.

Les analyses statistiques ont été réalisées dans R 4.1.1 (R Core Team, 2021). L'ANOVA a été réalisée avec la fonction `lme()` du package «`nlme`» (Pinheiro et al., 2021). Les graphiques d'interaction ont été obtenus avec la fonction `emmeans` du package «`emmeans`» (Lenth, 2021) et les lettres ont été obtenues par le test de Tukey à l'aide de la fonction `cld()` du package «`multcomp`» (Hothorn et al., 2008).

### 1.3 Résultats

Les LHE avaient une élévation allant de 0 à 4,1 m, avec une moyenne à 1,0 m et une médiane à 0,7 m. L'ANOVA révèle que plusieurs facteurs agissent seuls ou en interaction pour influencer la hauteur moyenne de la LHE (tableau 3). Les interactions quadruples, quintuples et sextuples ne sont pas présentées, puisqu'aucune d'elles n'était significative.

Tableau 3 Résultats de l'ANOVA présentant les effets simples et les interactions doubles et triples (les interactions quadruples, quintuples et sextuples ne sont pas présentées car elles ne sont pas ressorties comme étant significatives). Les lignes en gras représentent les termes significatifs à  $\alpha = 0,01$ .

Effet simple ou interaction	F	p	Effet simple ou interaction	F	p
			(suite)		
Type (de paysage)	2,196	0,132			
<b>Inventaire</b>	<b>101,639</b>	<b>&lt;0,001</b>	Type:Pondération:Recouvrement	0,253	0,958
<b>Strates</b>	<b>67,772</b>	<b>&lt;0,001</b>	Type:Pondération:Strates	0,508	0,803
<b>Dominance</b>	<b>19,675</b>	<b>&lt;0,001</b>	Type:Pondération:Dominance	0,399	0,880
Recouvrement	2,801	0,094	Type:Pondération:Inventaire	1,056	0,387
<b>Pondération</b>	<b>53,088</b>	<b>&lt;0,001</b>	Type:Recouvrement:Strates	3,161	0,043
			<b>Type:Recouvrement:Dominance</b>	<b>8,817</b>	<b>&lt;0,001</b>
Type:Pondération	1,467	0,185	Type:Recouvrement:Inventaire	1,576	0,207
<b>Type:Recouvrement</b>	<b>6,590</b>	<b>0,001</b>	Type:Strates:Dominance	1,183	0,307
<b>Type:Strates</b>	<b>19,539</b>	<b>&lt;0,001</b>	Type:Strates:Inventaire	2,272	0,103
Type:Dominance	3,335	0,036	Type:Dominance:Inventaire	0,181	0,834
<b>Type:Inventaire</b>	<b>15,395</b>	<b>&lt;0,001</b>	Pondération:Recouvrement:Strates	1,027	0,380
Pondération:Recouvrement	0,955	0,413	Pondération:Recouvrement:Dominance	0,320	0,811
Pondération:Strates	0,503	0,680	Pondération:Recouvrement:Inventaire	0,116	0,951
Pondération:Dominance	1,397	0,242	Pondération:Strates:Dominance	0,570	0,635
Pondération:Inventaire	0,439	0,725	Pondération:Strates:Inventaire	1,319	0,266
Recouvrement:Strates	3,250	0,072	Pondération:Dominance:Inventaire	0,693	0,556
Recouvrement:Dominance	0,720	0,396	Recouvrement:Strates:Dominance	0,000	0,989
Recouvrement:Inventaire	2,069	0,150	Recouvrement:Strates:Inventaire	6,435	0,011
Strates:Dominance	0,503	0,478	Recouvrement:Dominance:Inventaire	2,251	0,134
<b>Strates:Inventaire</b>	<b>9,347</b>	<b>0,002</b>	Strates:Dominance:Inventaire	0,106	0,745
Dominance:Inventaire	3,778	0,052			

À la lumière de ces résultats, il est possible de dégager certains constats par rapport à la végétation s'établissant près de la LHE, ainsi qu'aux modifications apportées à la méthode officielle. Les figures suivantes représentent des hauteurs de LHE obtenues en faisant la moyenne pour différentes méthodes. Par exemple, pour l'interaction Type\*Strates les LHE présentées sont une moyenne de l'ensemble des méthodes utilisant les quatre strates de végétation, comparées à la moyenne des

méthodes n'utilisant que les herbacées (Figure 3). Certaines moyennes combinent également les types de paysages lorsque ce facteur n'est pas ressorti important au sein d'une interaction significative.

En raison des interactions présentes, les résultats des différents effets seront présentés de façon groupée. D'abord, les interactions doubles Type\*Strates, Type\*Inventaire et Strates\*Inventaires seront présentées. Puis, l'interaction triple Type\*Recouvrement\*Dominance et l'effet simple de la pondération sont présentés.

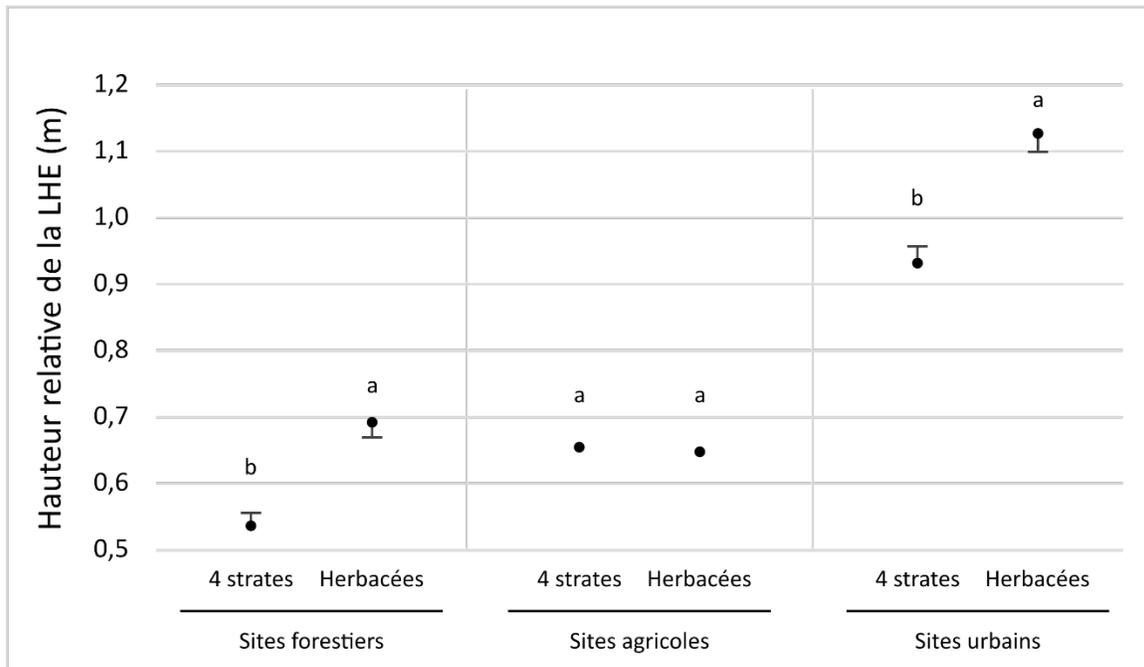


Figure 3 Graphique d'interaction Type de paysage\*Strates. Les barres verticales représentent la plus petite différence significative pour chacun des types de paysage et les lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Tukey. 4 strates : prise en compte de l'ensemble des strates, Herbacées : prise en compte des espèces enracinées au point d'inventaire uniquement (principalement la strate herbacée).

L'analyse révèle que lorsqu'on ne tient compte que des herbacées, la LHE remonte par rapport à celle délimitée avec l'utilisation des quatre strates, mais uniquement pour les sites où on retrouve un fort couvert arboré ou arbustif, soit en paysages forestier et urbain (figure 3). Modifier la méthode officielle pour ne tenir compte que des herbacées n'a pas d'influence sur la délimitation de la LHE en paysage agricole. Lorsqu'abondants, comme en paysages forestiers et urbains, les arbres et arbustes constituant la canopée sont donc principalement des espèces non indicatrices qui faussent le diagnostic de végétation et donnent une LHE plus basse qu'elle ne l'est réellement. Cela veut dire qu'en milieux forestiers et urbains, la végétation située au-dessus de la LHE délimitée par

la méthode officielle, qui prend en compte les espèces des quatre strates, est encore une végétation hygrophile. Il est à rappeler que selon la méthode officielle, un arbre ou un arbuste est noté comme étant présent même si cela n'est que par projection verticale au-dessus du quadrat ou du point de contact. Les espèces arborescentes et arbustives influencent la délimitation de la LHE même si elles sont enracinées à une autre élévation, plus haut sur la berge.

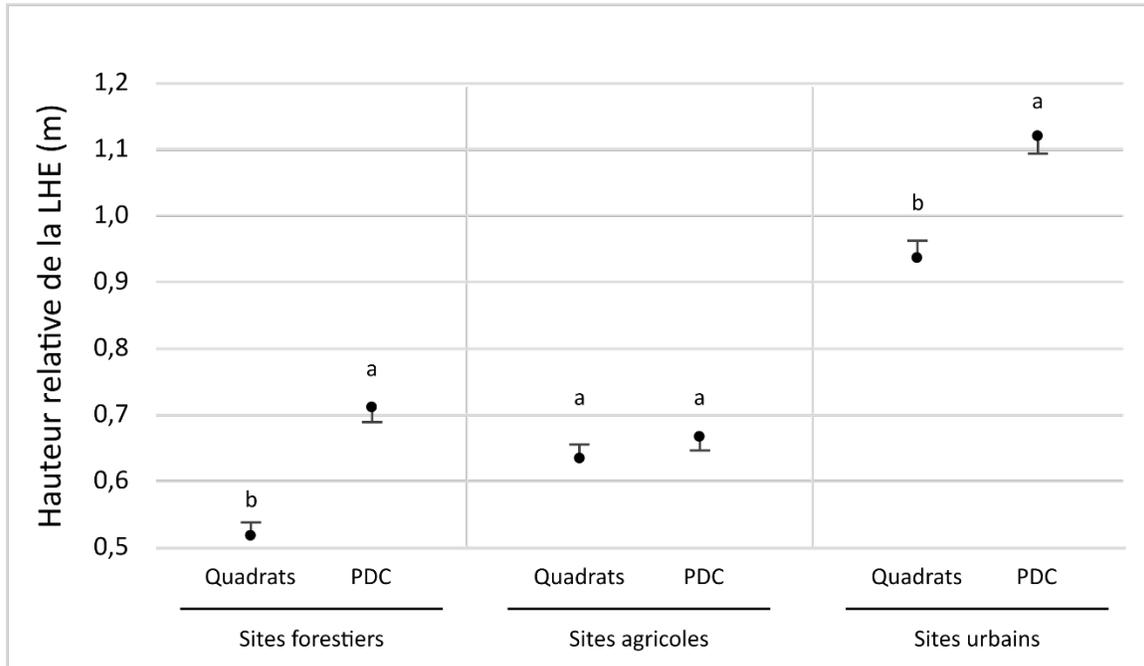


Figure 4 Graphique d'interaction Type de paysage\*Inventaire. Les barres verticales représentent la plus petite différence significative pour chacun des types de paysage et les lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Tukey. Quadrats : inventaires par quadrats, PDC : inventaires par points de contact.

La méthode d'inventaire choisie a un effet similaire sur la hauteur de la LHE que le fait de ne considérer que la strate herbacée: les inventaires par points de contact donnent des LHE plus élevées que les inventaires par quadrats mais seulement en paysage forestier et en paysage urbain (Figure 4). En paysage agricole, la méthode d'inventaire choisie n'a pas d'impact. Ainsi, dans les paysages forestiers et urbains, la végétation se trouvant au-dessus de la LHE officielle, qui est réalisée à l'aide de quadrats, est caractérisée par la présence d'espèces non indicatrices ayant un faible couvert. La méthode PDC détecte plus difficilement ces espèces (un peu à la façon d'un calcul de dominance), contrairement aux quadrats, qui permettent de recenser même des espèces ayant un couvert négligeable, puisqu'un point de contact peut plus facilement tomber à côté de celles-ci, alors qu'une estimation des couverts permet de les capter. De cette façon, l'influence de

ces espèces non indicatrices ayant un recouvrement plus faible est éliminée et le diagnostic végétal des points d'inventaires donne davantage de résultats «hygrophiles», ce qui fait remonter la LHE.

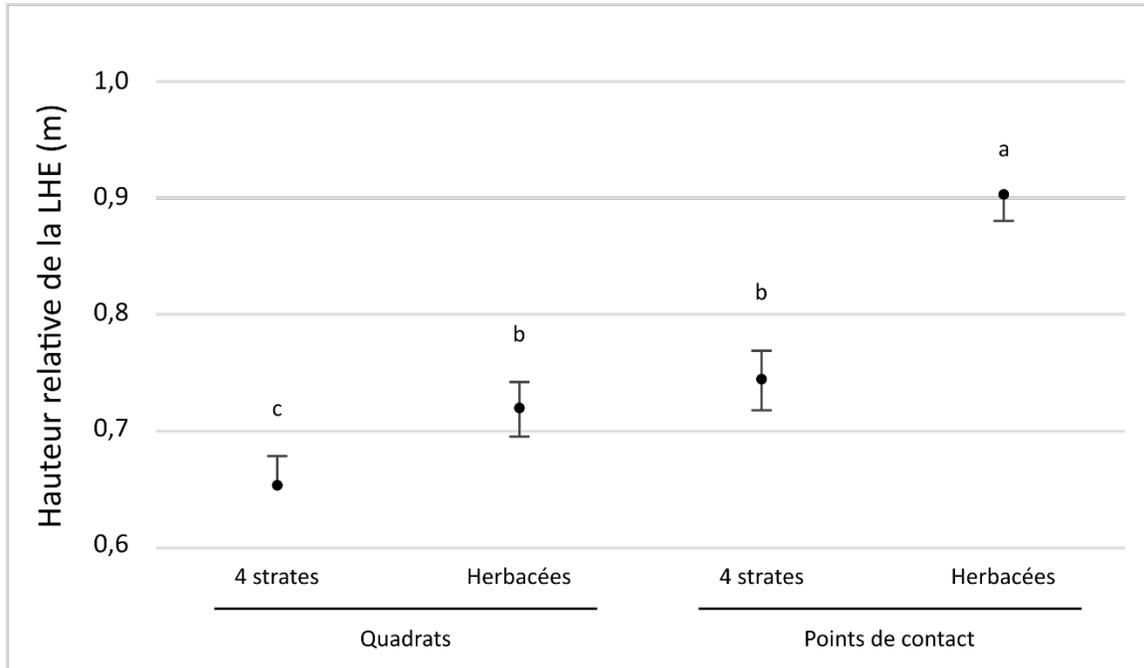


Figure 5 Graphique d'interaction Strates \* Inventaire. Les barres verticales représentent la plus petite différence significative et les lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Tukey. 4 strates : prise en compte de l'ensemble des strates, Herbacées : prise en compte des espèces enracinées au point d'inventaire uniquement (principalement la strate herbacée). Quadrats : inventaires par quadrats, PDC : inventaires par points de contact.

L'interaction entre les strates considérées et la méthode d'inventaire révèle un effet synergique de la combinaison des deux modifications, soit les inventaires par points de contact et ne considérant que les herbacées. Le fait de ne considérer que les herbacées plutôt que les quatre strates de végétation a un impact plus grand sur la LHE lorsqu'on utilise la technique d'inventaire par points de contacts que lorsqu'on procède avec des quadrats (figure 5). Plus précisément, ne considérer que les herbacées élève la LHE de 25 cm en moyenne avec la technique des points de contact, alors que cet effet n'est que de 7 cm pour les inventaires par quadrats.

La méthode officielle se base sur des inventaires par quadrats et tient compte des quatre strates de végétation. Cela veut dire que dans les communautés qui sont situées au-dessus de la LHE officielle, l'effet de l'une ou l'autre des modifications est en partie masqué par les espèces des strates surplombantes ou par les espèces non indicatrices ayant un couvert faible, omises par la méthode des points de contact.

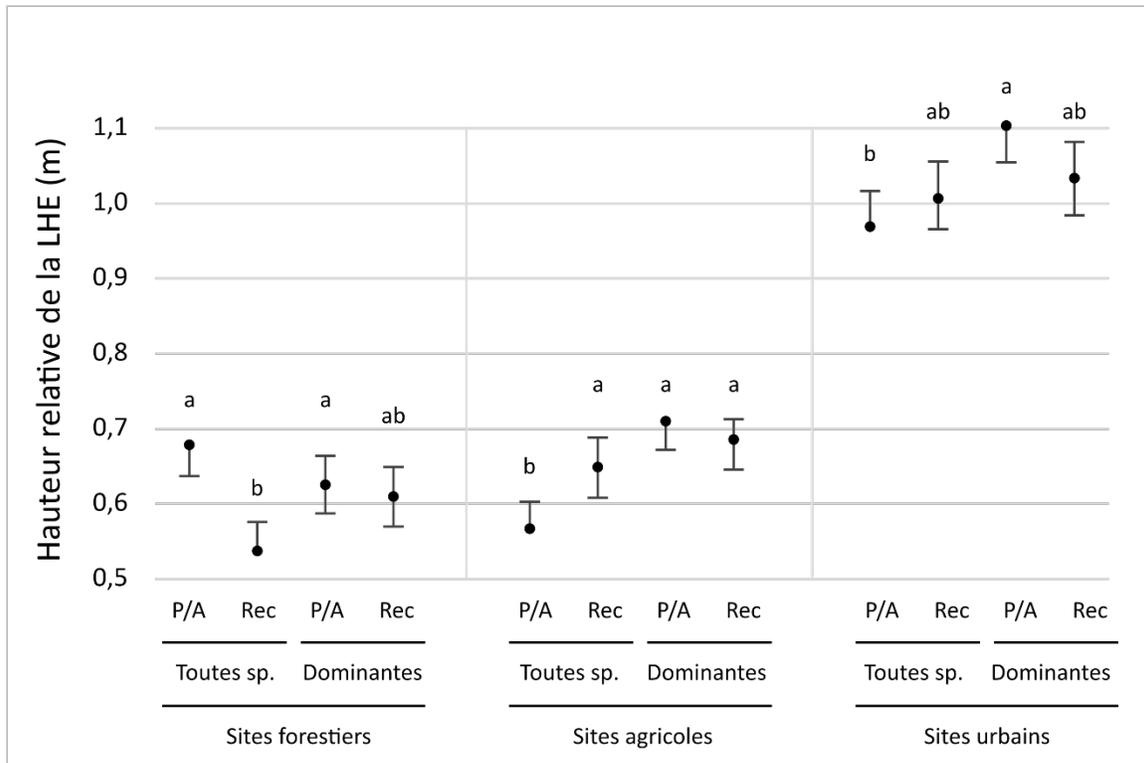


Figure 6 Graphique d'interaction Type de paysage \* Dominance \* Recouvrement. Les barres verticales représentent la plus petite différence significative pour chacun des types de paysage et les lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Tukey. P/A : utilisation de données de présence/absence, Rec : utilisation des données de recouvrement. Toutes sp. : toutes les espèces sont utilisées pour le diagnostic de végétation, Dominantes : seules les espèces dominantes sont utilisées pour le diagnostic de végétation.

Considérer le recouvrement des espèces plutôt que simplement leur présence influençait la LHE différemment selon que toutes les espèces ou seulement celles dominantes étaient prises compte et cet effet variait entre les types de paysages (interaction triple significative; tableau 3; figure 6). De façon globale, le changement de hauteur de la LHE causé par ces facteurs, seuls ou en combinaison, variait entre 13 et 14 cm, selon le type de paysage où il était observé. Cela représente une variation moindre que les changements de hauteur de LHE attribuables aux facteurs Inventaires et Strates, qui allaient jusqu'à 25 cm.

Aux sites situés en paysage forestier, le fait de tenir compte du recouvrement fait baisser la LHE si l'on inclut toutes les espèces dans le calcul au lieu des espèces dominantes seulement. Ainsi, pour la méthode officielle, qui ne tient pas compte du recouvrement et qui utilise l'ensemble des espèces pour le diagnostic de végétation, les espèces non indicatrices se trouvant dans les communautés situées au-dessus de la LHE ont un recouvrement plus important que les espèces indicatrices. La prise en compte de leur recouvrement donne ainsi davantage de diagnostics terrestres et fait remonter la LHE. Aux sites situés en paysage agricole, la LHE la plus basse est obtenue en

considérant la donnée de présence/absence de l'ensemble des espèces, alors que la prise en compte des recouvrements et/ou la prise en compte des espèces dominantes seulement donne une LHE significativement plus élevée. Ainsi, les espèces indicatrices situées au-dessus de la LHE obtenue par la méthode officielle ont un recouvrement plus important que les non indicatrices, puisque la prise en compte de ce recouvrement (ou l'élimination du calcul d'espèces non dominantes) donne davantage de diagnostics hygrophiles. Aux sites situés en paysage urbain, le fait de ne tenir compte que des espèces dominantes fait remonter la LHE, seulement si on ne tient pas compte du recouvrement. Cela veut dire que, au-dessus de la LHE délimitée par la méthode officielle, le calcul de dominance retient plus d'espèces indicatrices en nombre, mais celles-ci ont un recouvrement plus faible que les non indicatrices.

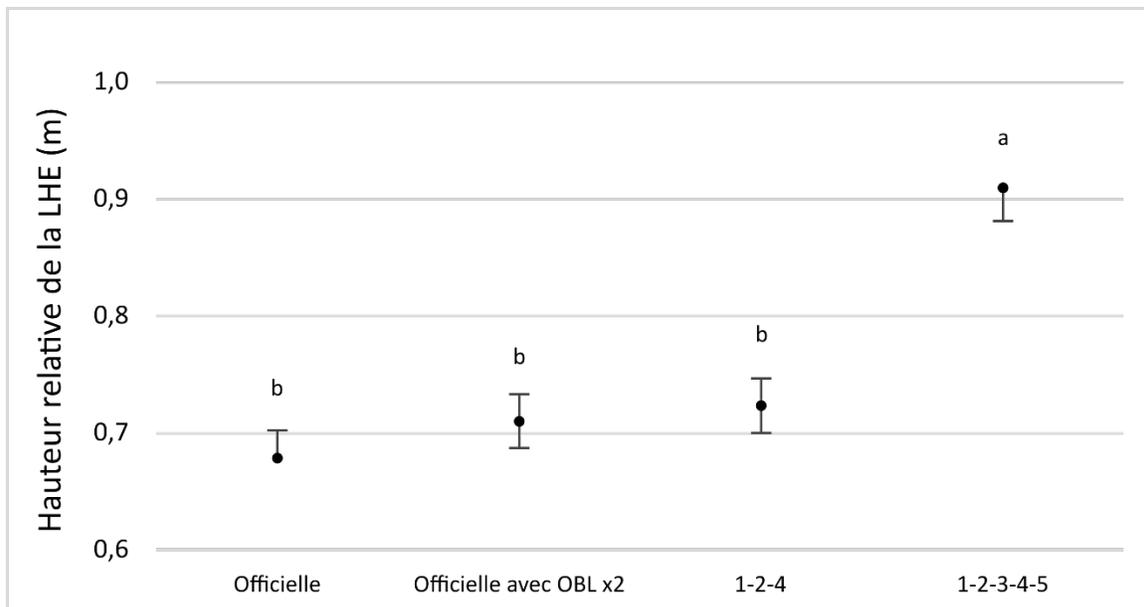


Figure 7 Graphique de l'effet du facteur Pondération. Les barres verticales représentent la plus petite différence significative et les lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Tukey. Officielle : pondération classant les espèces selon qu'elles sont indicatrices ou non, Officielle avec OBL x2 : pondération officielle modifiée pour doubler le poids des espèces OBL. 1-2-4 : pondération à trois niveaux selon le statut hydrique (OBL, FACH, NI), seuil à 3.0, 1-2-3-4-5 : pondération à cinq niveaux selon le statut hydrique (OBL, FACH, FAC, FACT, TER), seuil à 3.0.

L'impact de la pondération utilisée pour le calcul lors du diagnostic de végétation influence la hauteur de la LHE sans égard aux autres facteurs (figure 7). Ainsi, peu importe si on inclut toutes les espèces ou seulement les herbacées ou seulement les espèces dominantes, de même que si on considère leur présence ou leur recouvrement, au sein de quadrats ou aux points de contact, la méthode de calcul influençait la LHE de la même façon. La seule méthode donnant une LHE significativement plus élevée que la méthode officielle est la méthode à cinq niveaux. Les méthodes à trois niveaux (1-2-4) et à cinq niveaux (1-2-3-4-5) considèrent que les FAC ne sont pas davantage

associées aux milieux humides qu'aux milieux terrestres, alors que les méthodes basées sur la méthode officielle considèrent ces espèces comme des non-indicatrices, donc étant davantage associées aux milieux terrestres. Il est attendu que les communautés situées directement au-dessus de la LHE officielle, donc considérées terrestres, soient encore classées hygrophiles par les méthodes 1-2-4 et 1-2-3-4-5 (à condition que des espèces FAC soient présentes dans ces quadrats). On observe que c'est le cas de la méthode 1-2-3-4-5, mais pas de la méthode 1-2-4. Puisque la méthode 1-2-4 attribue un score de 4 à l'ensemble des espèces considérées NI au Québec, les espèces FAC reçoivent un score trop élevé et les espèces TER reçoivent un score trop faible. Le fait que la LHE ne remonte pas en utilisant la méthode 1-2-4 signifie que les espèces NI se trouvant au-dessus de la LHE délimitée par la méthode officielle sont davantage des espèces FAC que des FACT ou des TER, ce qui apporte un biais en faveur de délimitations terrestres.

#### 1.4 Discussion

Les modifications de la méthode qui ont été proposées ont toutes pour objectif d'améliorer la délimitation de la LHE par la méthode officielle, afin que celle-ci corresponde davantage à la LHE naturelle. D'abord, **la prise en compte des herbacées uniquement** vise à éliminer l'influence d'espèces d'arbres ou arbustes enracinées plus haut ou plus bas qui viennent fausser les inventaires. Cette proposition vient de l'idée selon laquelle le diagnostic de végétation doit se prononcer sur les communautés végétales s'établissant à une élévation précise. Les **inventaires par point de contact** quant à eux permettent de travailler plus rapidement, tout en réduisant l'importance d'espèces présentant des faibles couverts. Ces individus peuvent être notamment des plantules ou de jeunes plants d'espèces opportunistes qui profitent de la période exondée pour s'établir temporairement dans la zone située sous la LHE jusqu'à la prochaine crue, sans être des espèces de milieu humide (Tiner, 2016). La **prise en compte des espèces dominantes** par le calcul de dominance était proposée dans le même objectif, puisque l'effet est similaire, lorsque les strates de végétation sont bien fournies, en omettant carrément du diagnostic végétal les espèces non dominantes. À la différence de la méthode PDC, le calcul de dominance peut cependant parfois sélectionner des espèces qui ont un couvert assez faible, puisqu'il est basé sur les recouvrements relatifs. Si par exemple le recouvrement total de la strate herbacée est de 10 %, toutes les espèces faisant plus de 2 % de recouvrement absolu (20% de recouvrement relatif) seront considérées comme des dominantes, alors qu'elles ne seront vraisemblablement pas détectées par la méthode PDC. La **prise en compte des recouvrements** est proposée encore une fois dans cette même visée, puisqu'elle permet de donner une plus grande importance aux espèces dominantes, mais cette fois sans éliminer complètement l'influence d'espèces présentant de faibles couverts. Enfin, **la pondération** plus fine

utilisée dans le calcul final du diagnostic végétal et l'utilisation d'un seuil à 3.0 permettent visaient à représenter plus fidèlement la signification de la présence de chaque espèce selon son écologie pour mieux positionner la LHE.

### Strates et Inventaires

Les facteurs Strates et Inventaires influençaient grandement la LHE dans les sites situés en paysages forestiers et urbains, caractérisés tous deux par la présence d'arbres et d'arbustes. Le fait d'éliminer l'influence d'espèces enracinées ailleurs qu'au point d'inventaire avait pour effet de faire remonter la LHE. La prise en compte de la canopée située au-dessus d'un point d'inventaire a du sens dans un contexte de délimitation d'un milieu humide où le dénivelé est normalement plutôt faible, mais ceci est rarement le cas en milieux riverains. Une LHE plus élevée a également été trouvée lorsque les inventaires étaient réalisés par points de contact plutôt que par quadrats, ce qui omet du diagnostic de végétation les espèces ayant un faible couvert (puisque ces espèces ont une moins grande probabilité de détection avec les points de contact que par estimation visuelle de leur couvert). Cela révèle que les communautés végétales situées au-delà de la LHE positionnée avec la méthode officielle étaient encore ici dominées par des espèces de milieux humides, et ce malgré la présence d'espèces non-indicatrices ayant un faible couvert (plantules, ou individus ayant un établissement limité). De plus, les sites se trouvant en milieu fermé ont généralement une proportion importante de sol nu en raison de la présence d'arbres, ce qui pourrait les rendre davantage sujets à la colonisation par des espèces généralistes non indicatrices. Ces résultats suggèrent que les LHE obtenues par la méthode officielle sont trop basses lorsque réalisées dans les milieux fermés, i.e. où les arbres et arbustes sont abondants (paysages forestiers et urbains) et que les modifications proposées donnent des résultats qui sont plus près de la LHE naturelle.

Il est important de noter que les facteurs Strates et Inventaires agissent en synergie sur la délimitation de la LHE. En éliminant à la fois l'influence des espèces à faible recouvrement par la méthode des points de contact et l'influence des arbres et arbustes, la LHE remontait en moyenne de 25 cm. Dans la zone de transition située autour de la LHE, le diagnostic de végétation peut facilement basculer du côté terrestre ou hygrophile. Logiquement, les communautés hygrophiles situées directement sous la LHE naturelle se trouvent plus près du seuil hygrophile/terrestre. Ainsi, le fait d'inclure les arbres et arbustes dans ces communautés a un gros impact sur la LHE, qui est alors abaissée jusqu'aux communautés plus franchement hygrophiles, en bas de talus. Le même cas de figure se produit si, plutôt que d'inclure les arbres et arbustes, des espèces non indicatrices ayant un faible couvert comme des plantules sont incluses. Le fait d'inclure à la fois les arbres et arbustes

ainsi que les espèces non indicatrices à faible couvert fait descendre la LHE encore davantage. Cela dit, comme les communautés sont à cet endroit plus franchement hygrophiles, l'abaissement de la LHE n'est pas aussi important. Ainsi, le fait de ne considérer que la strate herbacée élimine un biais présent dans la méthode officielle, mais la remontée de la LHE reste limitée par le biais induit par les espèces non indicatrices ayant un faible recouvrement. Il est donc important d'intégrer ces deux modifications à la méthode officielle afin qu'elle soit plus fiable.

Il est intéressant de noter que la méthode par points de contact a l'avantage d'être plus rapide à appliquer que celle des quadrats, tout en fournissant une donnée de recouvrement (dérivé de la fréquence de points où l'espèce est notée). C'est pour cette raison que nous avons pu l'appliquer en continu sur nos transects. Cela a d'ailleurs l'avantage de permettre une résolution plus fine dans le positionnement de la LHE dans le cas de berges très longues.

#### Recouvrement et Dominance

Les facteurs Recouvrement et Dominance avaient également un impact sur la délimitation de la LHE, même si celui-ci était moindre. En paysage forestier, la hauteur de la LHE diminuait lorsqu'on tenait compte du recouvrement, ce qui semble indiquer que les quadrats situés sous une LHE obtenue par la méthode officielle étaient dominés par des espèces non indicatrices et que la méthode officielle donnerait ainsi une LHE trop élevée. Or, ce résultat est en contradiction avec l'interprétation découlant du facteur *Inventaires*, qui semblait indiquer que les quadrats situés au-dessus de la LHE obtenue par la méthode officielle étaient dominés par des espèces indicatrices de milieux humides. Une explication pour cette contradiction est le faible couvert de la strate herbacées en milieu forestiers. La méthode des espèces dominantes donne des LHE intermédiaires entre celles obtenues en tenant compte des recouvrements et celles obtenues sans en tenir compte, ce qui semble suggérer que la LHE naturelle se situe à un point intermédiaire.

En paysage agricole, la méthode officielle donnait une LHE significativement plus basse que si l'on appliquait l'une ou l'autre des modifications proposées, seules ou en combinaison. Cette différence s'élevait à plus de 14 cm au maximum. En paysage urbain, la LHE obtenue en combinant les deux modifications proposées n'était pas significativement différente de celle obtenue par la méthode officielle. Par contre, le fait d'apporter une seule de ces deux modifications (utilisation du calcul de dominance) donnait une LHE significativement plus élevée. Il semblerait donc que l'utilisation du calcul de dominance induise en erreur si elle n'est pas combinée à la prise en compte du recouvrement.

Le portrait des effets des facteurs *Recouvrement* et *Dominance* en interaction avec le type de paysage est complexe. Un constat qui se dégage est que l'utilisation d'une seule de ces modifications proposées peut induire en erreur, et en conséquence, les deux devraient être adoptées en combinaison, pour que la méthode officielle puisse être appliquée à la fois en paysage forestier et en paysage urbain. Cela dit, la différence d'élévation avec la LHE intégrant une seule ou les deux modifications se situe en moyenne entre 7 et 12 cm.

### Pondération

L'influence de la pondération et de la méthode de calcul utilisée pour le diagnostic de végétation doit être considérée en regard de la façon dont les espèces FAC sont considérées. Certaines méthodes les classent comme des espèces indicatrices, alors que d'autres les considèrent comme des espèces neutres. Mis à part la méthode québécoise officielle de délimitation de la LHE aucun exemple n'a été trouvé dans la littérature d'une méthode considérant les espèces FAC comme des espèces non indicatrices (donc davantage associées aux milieux terrestres; Lapointe et Jutras 2021). Les espèces FAC n'ont par définition aucune affinité ni pour les milieux humides, ni pour les milieux terrestres et ne sont donc indicatrices ni de l'un ni de l'autre (Tiner, 1993). Ceci est reflété dans la méthode de l'indice de prévalence (IP). Les méthodes du ratio de dominance (RD) et de l'indice de couvert hydrophytique (ICH) quant à elles considèrent plutôt les espèces FAC comme étant associées davantage aux milieux humides, puisqu'elles les considèrent comme des espèces indicatrices.

Pour les milieux humides, la méthode IP se trouve à mieux correspondre avec les délimitations utilisant les caractéristiques hydrologiques et pédologiques que la méthode RD (Lapointe et Jutras 2021). La méthode IP, considérant les espèces FAC comme neutres serait donc à privilégier. À l'inverse, la méthode ICH produirait des délimitations moins biaisées que les méthodes RD et IP (Lapointe et Jutras 2021). La méthode ICH, considérant les espèces FAC comme indicatrices, serait donc potentiellement celle à privilégier. En résumé, ces résultats semblent indiquer que les FAC doivent minimalement être considérées comme des espèces neutres, voire comme des espèces indicatrices de milieux humides.

Nos résultats montrent que l'application de la méthode IP donne une LHE plus élevée que les autres méthodes (en moyenne 24 cm de plus que la méthode officielle), ce qui est attendu, compte tenu que les espèces FAC ne sont alors plus considérées comme des espèces terrestres. Il apparaît essentiel que la méthode officielle soit modifiée pour que les FAC soient considérées comme des espèces neutres afin de refléter fidèlement l'absence de préférence écologique de celles-ci pour les

milieux humides ou terrestres. Il faudra pour ce faire mettre à jour la liste d'espèces pour aller plus loin que les trois catégories OBL, FACH et NI qui existe actuellement. En attendant une prochaine liste, la liste du USDA pour la région du Nord-Est des États-Unis (Lichvar et al., 2014) pourrait être utilisée pour classer les espèces qui ont présentement un statut NI.

Tel que mentionné plus haut, la méthode ICH a été en quelque sorte incluse dans nos 64 méthodes testées dans l'ANOVA (méthode 5; tableau 1). Ceci à la différence près que les espèces FAC avaient été considérées comme non indicatrices, afin d'être cohérent avec le reste des méthodes utilisant une pondération à deux niveaux (indicatrice ou non-indicatrice). Le fait de considérer les espèces FAC fait remonter la LHE d'une façon significative (différence de 28 cm; résultats non montrés). Cette différence est importante si on considère que c'est une moyenne réalisée sur 89 transects. Cela montre clairement que si la méthode retenue utilisée devait être la méthode ICH, il serait nécessaire de considérer les espèces FAC comme des indicatrices ou de développer une méthode neutre.

#### Comparaison avec les autres méthodes

Afin de discuter plus en détail des méthodes à proprement parler, nous avons calculé les hauteurs de LHE pour les méthodes les plus répandues citées dans Lapointe et Jutras (2021) pour chacun des transects réalisés. Les méthodes ont ici été utilisées selon leur définition, et donc pour les méthodes RD et ICH, les espèces FAC sont considérées comme des indicatrices (associées aux milieux humides). Nous avons ensuite comparé ces méthodes à la méthode officielle (figure 8).

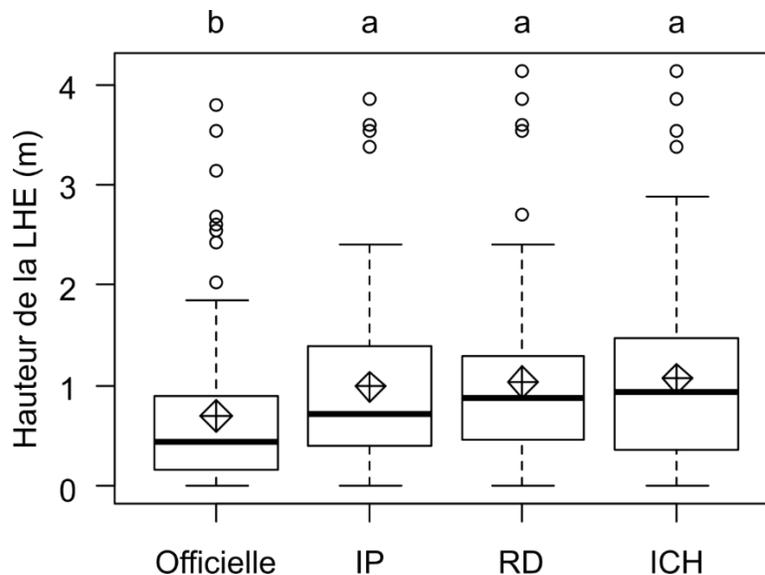


Figure 8 Comparaison des hauteurs de LHE obtenues avec la méthode officielle, la méthode de l'indice de prévalence (IP), la méthode du ratio de dominance (RD) et la méthode de l'indice de couverture hydrophytique (ICH). Les losanges

*représentent la hauteur moyenne de la LHE. Les lettres différentes indiquent que les moyennes sont significativement différentes entre elles d'après un test de Tukey.*

La méthode officielle du Québec donne la LHE la plus basse, à 0,70 m d'élévation en moyenne, alors que les trois autres méthodes donnent une LHE significativement plus élevée (0,99, 1,03 et 1,07 m d'élévation en moyenne pour l'IP, la RD et l'ICH respectivement). Cette différence d'élévation allant jusqu'à 37 cm ne représente pas forcément une grande superficie de terrain lorsque la berge a une forte pente, comme c'est le cas en paysage agricole. Cependant, lorsque la pente est faible, comme c'est le cas parfois en paysage urbain ou forestier, la différence peut être considérable lorsque rapportée en termes de distance horizontale.

#### Autres recommandations

Au sujet de la liste d'espèces de milieux humides placée en annexe des notes explicatives du Ministère (2015), nous recommandons, en plus de compléter les statuts pour les espèces FAC, FACT et TER, de mettre à jour le nom des espèces en se référant à la base de données VasCan (Brouillet et al., 2010), puisque la nomenclature a beaucoup changé depuis la dernière version du document.

Quant à la problématique du faible couvert d'herbacées en paysage forestier, il faudrait considérer élargir le transect. Actuellement fixé à une largeur de 1 m, il pourrait être intéressant de sortir de cette limite pour capter un nombre suffisant d'espèces. Il pourrait éventuellement être pertinent de tenir compte des arbres, mais cela pose deux problèmes. Le premier est que la prise en compte d'une strate arborescente, comme c'est le cas pour la délimitation des milieux humides, doit se faire dans des quadrats ayant une superficie plus importante que celle utilisée pour des espèces herbacées (Lachance et al., 2021). Cela entraîne le second problème, qui est la variabilité du milieu en bordure de rivière : les différences d'élévation s'expriment parfois sur des distances assez courtes et il est donc difficile d'étendre la zone d'inventaire en conservant la même élévation. Gage et Cooper (2010) suggèrent pour le milieu riverain de faire des inventaires dans des parcelles rectangulaires (côté long parallèle au cours d'eau), mais cela peut également amener son lot de défis dans un milieu ayant une microtopographie complexe. La question de comment il serait possible de prendre en compte la strate arborescente reste à explorer.

#### 1.5 Conclusion pour la méthode botanique

Avant de conclure sur la méthode botanique, une mise en garde s'impose. Les rivières incluses dans la présente étude sont situées à l'intérieur d'une région limitée à la Capitale Nationale et ses environs. Il faut donc être prudent avec l'extrapolation des résultats à d'autres régions. La classification des espèces de milieux humides concerne le sud du Québec seulement et ne saurait

être appliquée en régions plus nordiques. De plus, bien qu'ayant été réalisée de façon systématique, cette étude se base sur un échantillonnage de 30 tronçons de rivières uniquement, ayant des largeurs relativement faibles, et ne permet pas de conclure sur l'impact des modifications proposées pour la délimitation de rivières plus larges.

Nos analyses nous permettent de faire trois recommandations principales par rapport à la méthode botanique officielle. D'abord, il faudrait cesser d'inclure la canopée dans les inventaires. Pour tenir compte des arbres et arbustes, il faudrait prendre en compte l'emplacement où ils sont enracinés, mais les inventaires dans leur forme actuelle ne le permettent pas. Ensuite, il faut trouver une façon d'éliminer ou de réduire l'influence des plantules et autres espèces à faible couvert, par exemple en utilisant la méthode des points de contact, qui présente également l'avantage d'être plus rapide pour la réalisation d'inventaires. Enfin, il faudrait éviter de considérer les espèces FAC comme des espèces associées aux milieux terrestres, puisque cela biaise les diagnostics de végétation en faveur de diagnostics terrestres. Il faudrait soit les inclure dans la catégorie des espèces indicatrices, lorsqu'on utilise une méthode classant les espèces en indicatrices et non indicatrices (comme c'est le cas pour les méthodes de l'indice de couvert hydrophytique; ICH, ou du ratio de dominance; RD), soit les considérer comme neutres, comme il est possible de le faire par la pondération à cinq niveaux, issue de la méthode de l'indice de prévalence (IP). Il sera donc nécessaire d'actualiser la liste d'espèces des milieux humides pour le Québec.

## 1.6 Analyses supplémentaires

En complément aux analyses que nous avons faites sur la méthode de délimitation à proprement parler, nous nous sommes penchées sur les communautés végétales des milieux riverains échantillonnés lors des inventaires.

Afin de mieux comprendre la distribution des espèces selon un gradient latéral, nous avons utilisé une méthode de groupement visant à identifier des communautés végétales et avons cherché à comprendre comment celles-ci se positionnent par rapport à la LHE.

En utilisant les inventaires provenant des quadrats, tenant compte des recouvrements et considérant l'ensemble des espèces de la strate herbacée, nous avons réalisé un groupement en utilisant la méthode à liens complets pour chacun des types de paysage. De cette façon, les quadrats sont groupés ensemble seulement s'ils ont l'ensemble de leurs espèces en commun, ou encore si la composition en espèces d'un quadrat est un sous-ensemble des espèces d'un autre quadrat. Par contre, ils ne seront pas regroupés si le premier contient un sous-ensemble d'espèces du deuxième, plus une espèce différente.

De cette façon, 23 groupes ont été formés pour les sites forestiers, 13 groupes pour les sites agricoles et 25 groupes pour les sites urbains (ce qui correspond au plus petit nombre de groupes qu'il était possible de réaliser). Seuls les groupes formés de 10 quadrats ou plus provenant d'au moins deux sites différents ont été considérés pour la suite des analyses, afin qu'ils soient représentatifs d'un ensemble de conditions et qu'ils permettent de décrire une réalité associée au type de site, et non à un site particulier. Il en est ressorti 9, 12 et 9 pour les sites forestiers, agricoles et urbains, respectivement.

Les groupes de quadrats correspondent à des groupes d'espèces distincts. Une analyse des espèces indicatrices a donc été réalisée afin d'identifier les espèces qui étaient plus fortement associées à un groupe qu'à un autre. Tous les groupes auxquels était associée au moins une espèce ont été retenus, à condition que cette espèce soit présente dans plus de 50% des quadrats, pour un total de 7, 12 et 6 groupes pour les paysages forestiers, agricoles et urbains respectivement. Pour situer ces quadrats par rapport à la LHE, une élévation relative leur a été attribuée. Cette élévation correspondait à la différence d'élévation du quadrat par rapport à la LHE obtenue à l'aide de la méthode de l'indice de prévalence pour chacun des transects. Cette méthode a été choisie puisqu'elle considère les espèces FAC comme des espèces neutres.

Les analyses ont été réalisées dans R 4.1.1 (R Core Team, 2021). Le groupement a été réalisé avec la fonction `hclust()` du *package* «stats» et les espèces indicatrices ont été obtenues à l'aide de la fonction `indval()` du *package* «labdsv» (Roberts, 2019).

Les résultats sont présentés aux figures 9, 10 et 11. Les espèces indicatrices sont présentées dans les tableaux accompagnant les figures.

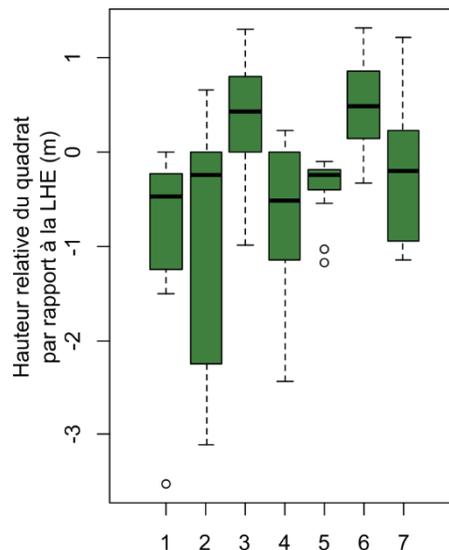


Figure 9 Élévation relative des groupes d'espèces retrouvés en paysage forestier.

Tableau 4 Liste des espèces indicatrices pour les groupes d'espèces confinés sous la LHE ou pour les groupes d'espèces ayant une large répartition de part et d'autre de la LHE en paysage forestier (Figure 9). Le numéro du groupe associé à l'espèce est indiqué entre parenthèses.

<b>Sous la LHE</b>	<b>De part et d'autre de la LHE</b>	<b>Au-dessus de la LHE</b>
<i>Agrostis stolonifera</i> (1)	<i>Athyrium filix-femina</i> (7)	
<i>Matteuccia Struthiopteris</i> (5)	<i>Claytosmunda claytoniana</i> (4)	
	<i>Parathelypteris noveboracensis</i> (2)	

En milieu forestier, les groupes se trouvant sous la LHE sont caractérisés par des espèces FACH, alors que les espèces caractéristiques des communautés se répartissant largement de part et d'autre de la LHE sont des non indicatrices selon le classement québécois (figure 9; tableau 4). Mis à part *Agrostis stolonifera*, ce sont des espèces indigènes.

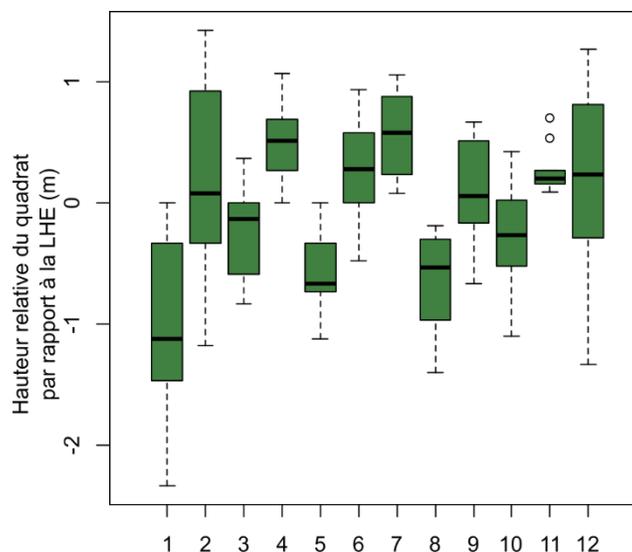


Figure 10 Élévation relative des groupes d'espèces retrouvés en paysage agricole.

Tableau 5 Liste des espèces indicatrices pour les groupes d'espèces confinés sous ou au-dessus de la LHE, ou pour les groupes d'espèces ayant une large répartition de part et d'autre de la LHE en paysage agricole (Figure 10).

Sous la LHE	De part et d'autre de la LHE	Au-dessus de la LHE
<i>Apios americana</i> (1)	<i>Clematis virginiana</i> (2)	<i>Anthriscus sylvestris</i> (7)
<i>Bidens cernua</i> (5)	<i>Rubus idaeus</i> (12)	<i>Bromus inermis</i> (11)
<i>Calamagrostis canadensis</i> (1)		<i>Symphytum officinale</i> (4)
<i>Callitriche palustris</i> (5)		<i>Vicia sepium</i> (7)
<i>Cornus sericea</i> (8)		
<i>Juncus bufonius</i> (5)		
<i>Leersia oryzoides</i> (5)		
<i>Lythrum salicaria</i> (5)		

En milieu agricole, les espèces caractéristiques de groupes situés sous la LHE incluent des espèces OBL et FACH, alors que les espèces se retrouvant dans les autres groupes sont des espèces non indicatrices (figure 10, tableau 5). Ici, les espèces caractéristiques se retrouvant sous la LHE ou se répartissant de part et d'autre sont indigènes, à l'exception de *Lythrum salicaria*, qui est considérée envahissante. Les espèces caractéristiques associés aux groupes situés au-dessus de la LHE sont quant à elles toutes des espèces introduites.

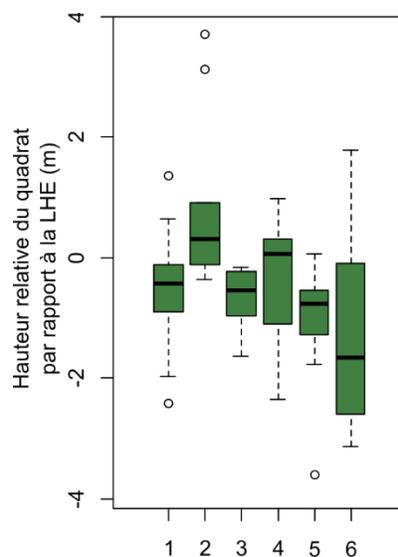


Figure 11 Élévation relative des groupes d'espèces retrouvées en paysage urbain.

Tableau 6 Liste des espèces indicatrices pour les groupes d'espèces confinés sous la LHE ou pour les groupes d'espèces ayant une large répartition de part et d'autre de la LHE en paysage urbain (Figure 11).

Sous la LHE	De part et d'autre de la LHE	Au-dessus de la LHE
<i>Impatiens capensis</i> (3)	<i>Cornus sericea</i> (1)	
<i>Onoclea sensibilis</i> (5)	<i>Symplocarpus foetidus</i> (6)	
<i>Thalictrum pubescens</i> (3)	<i>Tussilago farfara</i> (4)	

En milieu urbain, les espèces caractéristiques retrouvées sous la LHE sont des espèces FACH alors que les espèces retrouvées de part et d'autre incluent une OBL (*Symplocarpus foetidus*), une FACH (*Cornus sericea*) et une non indicatrice (figure 11, tableau 6). À l'exception de *Tussilago farfara*, ce sont toutes des espèces indigènes.

Certaines espèces ayant un recouvrement important dans les groupes ne sont pas présentées en raison de leur caractère généraliste. Ces espèces se retrouvant dans plusieurs communautés à la fois incluent *Equisetum arvense*, *Eutrochium maculatum* (seulement dans des groupes confinés à la zone située sous la LHE), *Onoclea sensibilis*, *Phalaris arundinacea*, *Tussilago farfara* et *Vicia cracca*. On note la présence de deux espèces retrouvées dans les milieux perturbés (*Equisetum arvense*, *Tussilago farfara*). Bien qu'elles ne soient pas indicatrices, elles peuvent se retrouver en-dessous de la LHE et pourraient influencer son positionnement dans des milieux fortement perturbés (érosion importante, piétinement, etc.). De façon similaire, *Vicia cracca* était présente autant au-dessus qu'en-dessous de la LHE en milieu agricole, bien qu'elle soit non indicatrice.

Il semble que les espèces non indicatrices ont davantage tendance à se retrouver sous la LHE que les espèces OBL et FACH se retrouver au-dessus de celle-ci. Ainsi, le biais apporté par les perturbations de façon générale aurait pour effet de faire baisser la hauteur de la LHE, en augmentant la quantité d'espèces associées aux milieux terrestres dans les quadrats situées sous l'emplacement de la LHE naturelle.

Une exception à cette observation serait la présence de *Cornus sericea* et *Symplocarpus foetidus* dans les groupes d'espèces se retrouvant au-dessus de la LHE en milieu urbain, ce qui semble plutôt indiquer la présence de zones humides, possiblement des dépressions retrouvées dans la plaine inondable. Ces caractéristiques de l'habitat peuvent effectivement entraîner un biais et doivent être considérées par les personnes réalisant l'inventaire.

Enfin, on observe qu'en milieu agricole, même si la végétation est fortement perturbée par la présence d'espèces introduites provenant des champs avoisinants, cela n'empêche pas ces espèces de se répartir en fonction de leur statut hydrique de part et d'autre de la LHE. Les LHE délimitées en milieu agricole paraissent même être plus fiables en raison de la densité de végétation retrouvée dans ce milieu.

## 2 Méthode hydrologique/hydraulique

### 2.1 Introduction

La méthode hydrologique et hydraulique inclut les étapes suivantes :

1. Détermination de la crue de récurrence 2 ans pour les rivières ciblées
2. Échantillonnage des tronçons modélisés
3. Modélisation hydraulique des niveaux d'eau associés à la crue de récurrence 2 ans.

Les niveaux modélisés sont ensuite comparés à ceux estimés avec les autres méthodes.

### 2.2 Méthodologie de l'analyse hydrologique

La détermination des débits associés aux crues de récurrence 2 ans a été complétée par analyse fréquentielle régionale (AFR). Les étapes méthodologiques de l'AFR ont été décrites dans le précédent rapport et sont résumées ici :

La première étape consiste à faire une analyse fréquentielle locale à partir des séries de débits maximaux annuels provenant des rivières jaugées, c'est-à-dire sur lesquelles des chroniques de débits existent. L'analyse fréquentielle univariée est une méthode de prédiction probabiliste, qui

consiste à déterminer la période de retour associée à la probabilité qu'un certain débit soit égalé ou dépassé pour un cours d'eau donné, selon l'Équation (5) :

Équation 5

$$T(x) = \frac{1}{1-p}$$

Avec :

$T(x)$  : période de retour d'un débit lié à un évènement  $x$  donné (unité de temps);

$p$  : probabilité au non-dépassement, tel que  $p=1-F(x,\Theta)$ , et  $\Theta$  sont les paramètres de la distribution de probabilité cumulative. Cette analyse nécessite l'ajustement de ladite distribution aux séries de débits maximaux provenant de chaque station. Une fois l'ajustement fait, la valeur du quantile de débit  $Q(x)$  de période de retour 2 ans ( $p=0,5$ ) est estimée à chaque site jaugeé.

Équation 6

$$Q(x) = F(x)^{-1}$$

L'étape suivante consiste à regrouper les rivières qui ont un comportement hydrologique similaire en voisinages dits « homogènes ». Deux approches statistiques multivariées ont été utilisées: la classification ascendante hiérarchique (CAH) et l'analyse canonique des corrélations (ACC) (Burn *et al.*, 1997; Chebana *et al.*, 2014; Mosaffaie, 2015; Ouarda *et al.*, 2008; Ouarda *et al.*, 2001). L'ACC a été complétée afin d'obtenir des combinaisons linéaires des variables physiographiques et climatiques qui caractérisent chaque station et leur bassin versant. L'ACC maximise la corrélation entre les combinaisons des variables climatiques/physiographiques avec les variables hydrologiques (quantiles de crue). Les variables canoniques ainsi créées ne sont pas corrélées entre elles. La seconde étape consistait à procéder à une classification ascendante hiérarchique en utilisant les variables canoniques. La CAH a été complétée en calculant la distance euclidienne entre chaque station et le critère de variance minimale de Ward (Ward, 1963). Les groupes de station ainsi créés devraient être relativement homogènes. Cette homogénéité a été vérifiée à l'aide du critère proposé par Hosking et Wallis (1997) et d'une mesure de discordance décrite par les mêmes auteurs.

Par la suite, un modèle permettant d'estimer les quantiles à des sites non jaugeés à partir des sites jaugeés a été construit pour chaque région homogène. Deux méthodes d'estimation des quantiles ont été évaluées, à savoir la méthode de l'indice de crue (« Index Flood », ou IF) et une prévision plus directe des quantiles par régression (QR). Dans les deux cas, le modèle général additif

(« Generalized Additive Model » ou GAM) a été utilisé pour effectuer la régression entre la variable explicative et la variable dépendante. Dans la méthode IF, la variable prédite est le débit maximal annuel moyen, qui doit être multiplié par un facteur de croissance (rapport entre le quantile moyen de période de retour 2 ans et le module du débit) pour obtenir le quantile de 2 ans, tandis que dans la méthode QR, la variable dépendante est directement le quantile T= 2 ans.

Le modèle général additif (GAM; Trevor et Robert, 1986) a été utilisé. Les modèles additifs généralisés (Hastie et Tibshirani 1986) offrent une plus grande flexibilité que les modèles linéaires en permettant de modéliser des relations non linéaires. Pour une variable dépendante  $Y$ , les modèles additifs généralisés peuvent être exprimés comme suit :

*Équation 7*

$$g(E(Y|\mathbf{X})) = \alpha + \sum_{j=1}^p f_j(X_j) + \varepsilon$$

où  $f_j$  est la fonction de lissage de la variable indépendante  $X_j$  et peut être définie comme suit :

*Équation 8*

$$f_j(x) = \sum_{i=1}^q \beta_{ji} b_{ji}(x)$$

où les  $b_{ji}(x)$  sont des fonctions de base qui sont combinées linéairement pour l'estimation de la fonction de lissage et  $q$  est la dimension des fonctions de base (le nombre de nœuds).

La performance du modèle a été vérifiée par validation croisée. Cette validation considère un site jaugé comme étant un site sans mesure et utilise le modèle calé à partir des autres sites de la région homogène pour estimer le quantile d'intérêt (T=2 ans). Cette procédure est répétée pour chaque site à l'intérieur de la région homogène et la performance du modèle est évaluée à l'aide de la racine de l'erreur quadratique moyenne relative (« Relative Root Mean Square Error », ou %RMSE) et le biais relatif (%Biais) :

*Équation 9.*

$$\%RMSE = 100 \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2}$$

Équation 10

$$\%BIAS = 100 \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)$$

où  $y_i$  est la valeur observée,  $\hat{y}_i$  est la valeur estimée et  $N$  est le nombre de sites dans la région homogène.

### 2.3 Méthodologie de la modélisation hydraulique

Une fois les quantiles de période de retour deux ans estimés à chaque site, une simulation hydraulique a été complétée à l'aide du modèle HEC-RAS (USACE, 2016), en utilisant le module 1-D en régime permanent pour un écoulement sous-critique.

Le modèle est basé sur les principes de conservation de la masse et de conservation de la quantité de mouvement.

En 1-D, pour les écoulements graduellement variés, ces équations sont:

- L'équation de continuité

Équation 11

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} - q = 0$$

- L'équation de quantité de mouvement

Équation 12

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0$$

où :

- $u$  = vitesse dans la direction  $x$  (m/s)
- $h$  = niveau d'eau (m)
- $x$  = distance dans la direction de l'écoulement (m)
- $t$  = temps (s)
- $q$  = apports latéraux ( $m^3/s$ )
- $S_0$  = pente du lit (m/m)
- $S_f$  = pente de la ligne d'énergie

- $g = \text{Constante gravitationnelle (m}^2/\text{s)}$

Les simulations 1-D nécessitent moins de données en intrants que les modèles hydrauliques 2-D ou 3-D. Les simulations en régime permanent sont jugées adéquates lorsque le modèle est appliqué à un tronçon relativement court (Gary et al., 2020).

Durant le calage du modèle, le débit est un intrant constant et le niveau d'eau simulé dans la section la plus en aval du tronçon a été utilisée comme condition limite. Afin de caler le modèle, le coefficient de rugosité de Manning a été ajusté afin d'obtenir des niveaux simulés les plus similaires possible aux valeurs observées lors des mesures de débit. L'erreur du modèle a été évaluée à l'aide de l'erreur relative (%ERROR) définie dans l'équation 13 :

*Équation 13*

$$\%ERROR = \frac{abs(\hat{h} - h)}{\bar{h}}$$

Afin de prendre en compte l'incertitude associée à l'estimation du quantile de période de retour deux ans, les limites inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance et les valeurs extrêmes du coefficient de rugosité de Manning ont été utilisées aussi dans la simulation.

## 2.4 Résultats de la méthode hydrologique/hydraulique

### 2.4.1 Collecte des données et importation des données dans HEC-RAS

Les données nécessaires au calage d'un modèle hydraulique 1D ont été recueillies sur les sites à l'étude. Ces données incluent :

- La bathymétrie de sections (3 à 5) transversales de la rivière le long du tronçon modélisé.
- Le débit ponctuel de la rivière
- Les hauteurs d'eau observées à des endroits précis des sections transversales
- La pente de la surface de l'eau
- Les informations permettant une caractérisation de la rugosité du fond de la rivière et des berges (type de substrat, végétation, présence de blocs de roche, etc.).

Les sections transversales ont été géoréférencées et représentées dans un système d'information géographique (QGIS). Les informations bathymétriques collectées sur le terrain ont été saisies dans l'éditeur de section transversale du logiciel HEC-RAS.

Les stations étudiées sont localisées dans la figure 12. Ces stations incluent les 80 stations de l'AFR et les 22 tronçons de rivière à l'étude.

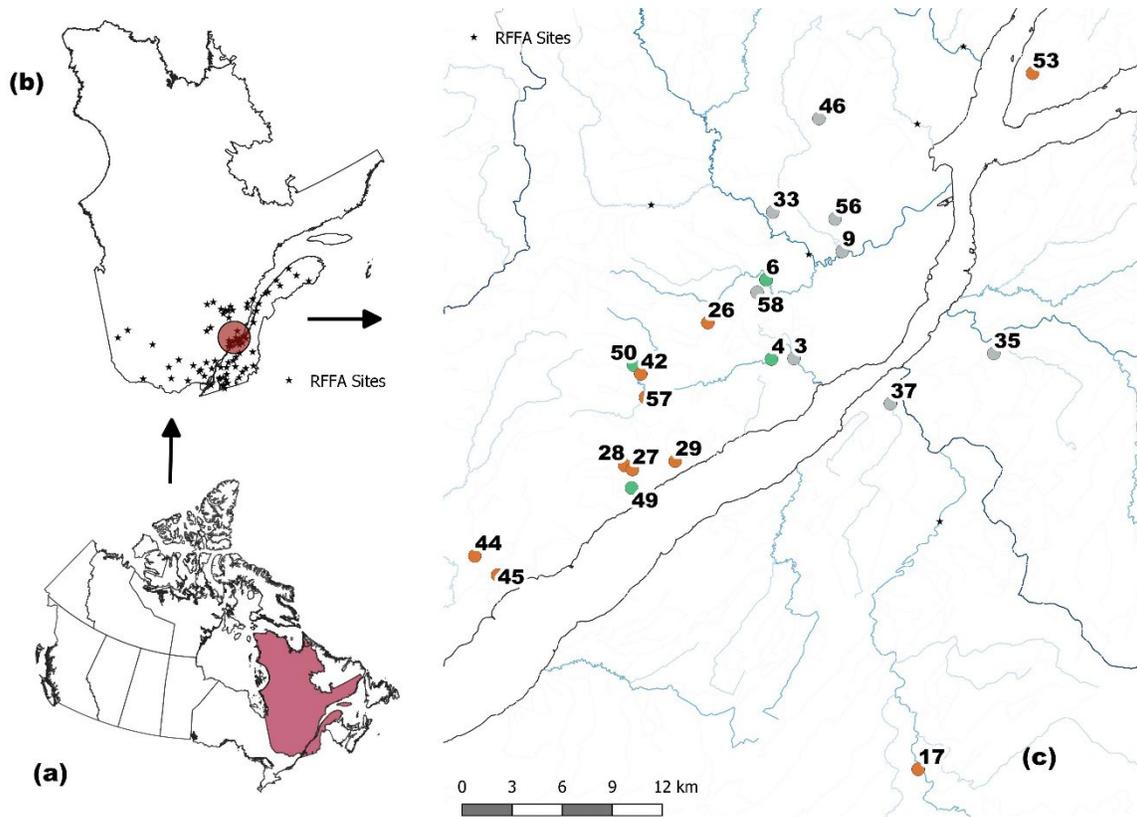


Figure 12. Localisation des rivières incluses dans la présente étude.

#### 2.4.2 Résultats de l'analyse régionale.

Quatre régions homogènes ont été créées par l'ACC (tableau 7). Bien que la région 2 donne une mesure de discordance élevée pour les stations qui y sont regroupées, cela n'a pas d'incidence sur les analyses qui suivent, puisqu'aucune des stations indiquées à la figure 1 s'y retrouve.

Tableau 7. Régions homogènes définies par l'ACC et nombre de stations.

Region	Mesure de discordance	Interprétation	Nombre de stations
1	0,38	Homogène	18
2	1,58	Possiblement hétérogène	19
3	0,75	Homogène	26
4	0,67	Homogène	17

La carte des régions homogènes avait été présentée dans le rapport d'étape. Elle est reproduite ci-dessous :

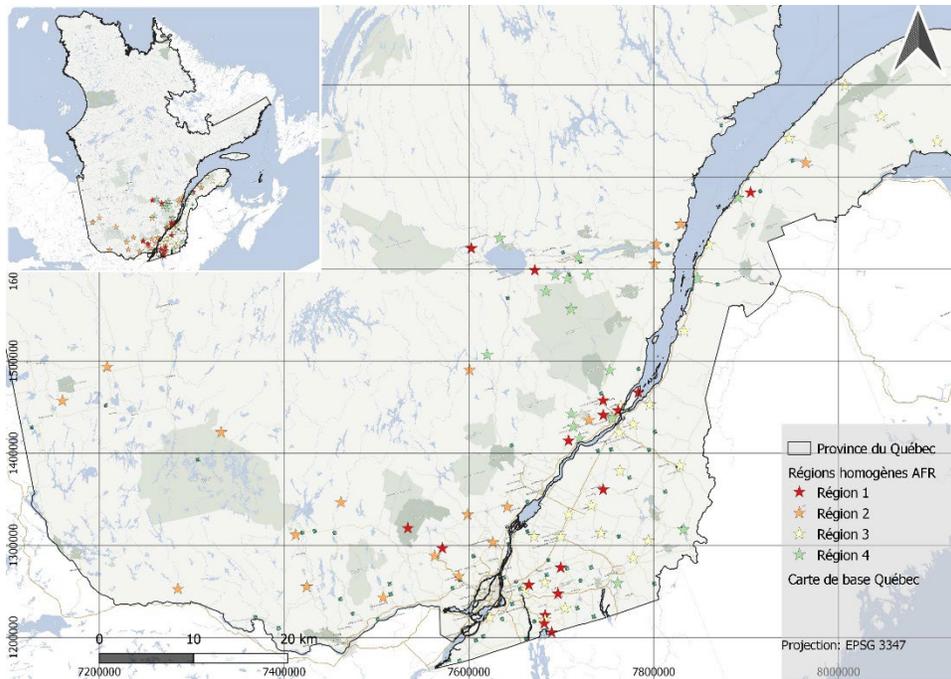


Figure 13. Régions homogènes définies pour l'analyse fréquentielle régionale.

La figure ci-dessous montre la distribution des variables explicatives pour chaque région. 21 des 22 sites étudiés ont une superficie de bassin versant inférieure à 306 km<sup>2</sup> et font partie de la région 1. La station 17 se distingue par une superficie plus élevée (310 km<sup>2</sup>) et un pourcentage de superficie occupée par les lacs plus important (2,6%). Cette station fait partie de la région 3.

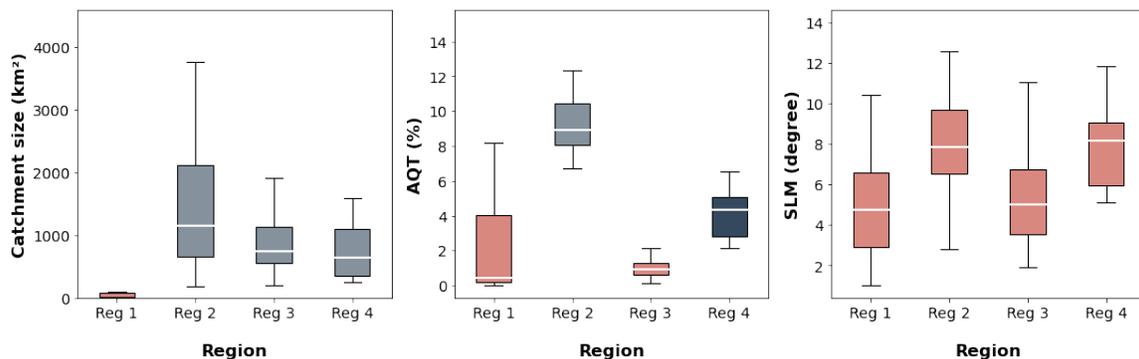


Figure 14. Diagrammes en boîte montrant la distribution des variables explicatives pour chaque région.

Les quantiles de période de retour 2 ans et leur intervalle de confiance à 95% sont présentés pour chaque méthode et chaque station dans la figure 15. Les mesures de performance sont données dans le tableau 8. On constate que les résultats sont assez similaires pour les deux approches

d'estimation. Dans la région 1, qui contient presque toutes les stations étudiées, le RMSE est légèrement plus faible pour l'approche QR, tandis que le biais est légèrement plus faible pour la méthode IF.

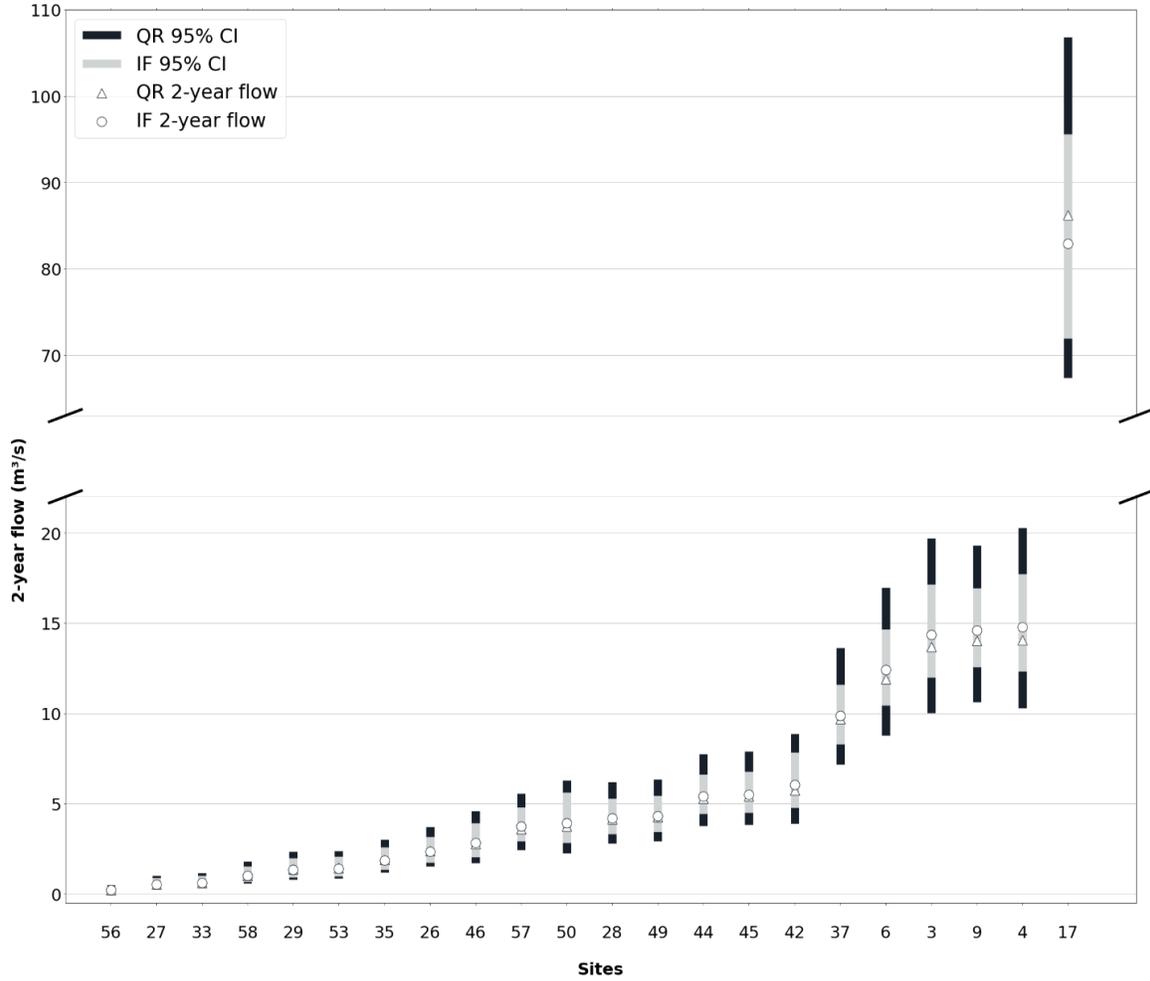


Figure 15. Quantiles estimés à chaque station, en ordre croissant.

Tableau 8 Résultats de la validation croisée pour les deux méthodes d'estimation des crues

	QR				IF			
	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	%RMSE (%)	BIAS (m <sup>3</sup> /s)	%BIAS (%)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	%RMSE (%)	BIAS (m <sup>3</sup> /s)	%BIAS (%)
<b>Region 1</b>	5,1	21,9	0,07	-3,0	3,4	22,2	0,32	-2,7
<b>Region 3</b>	28,7	19,2	0,19	-1,9	32,92	17,8	0,81	-1,8

### 2.4.3. Résultats de la modélisation hydraulique

La figure ci-dessous présente le niveau d'eau observé tracé par rapport au niveau d'eau simulé pour tous les transects. Les modèles sous-estiment le niveau d'eau à 24 sections et surestiment les niveaux observés à 47 sections. La sous-estimation moyenne est de 3,6 cm, alors que la surestimation moyenne est de 7,21 cm.

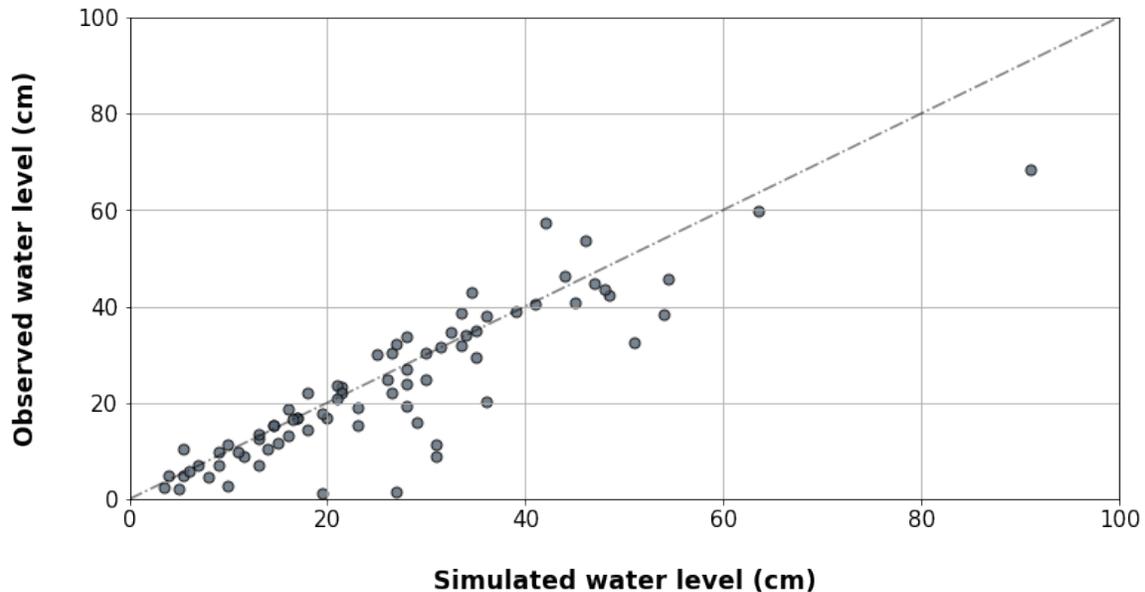


Figure 16. Comparaison des niveaux simulés et observés à toutes les sections échantillonnées.

L'erreur relative absolue entre les niveaux d'eau observé et simulé est tracée en fonction du débit mesuré à la figure 6. Chaque ligne pointillée verticale représente un tronçon de rivière, et chaque point représente un transect sur le tronçon de la rivière. La ligne verte horizontale pointillée est située à l'erreur relative absolue de 25 %. À part les sites 26 et 50 (points encadrés en rouge à la figure 2.7.a), il y a une bonne concordance entre les hauteurs d'eau observées et simulées. Il convient de noter qu'à certains sites (6, 27, 28, 33, 35, 42, 46, 49, 57, 58), les modèles n'ont pas été en mesure de reproduire adéquatement le niveau d'eau observé à tous les transects avec une seule valeur du coefficient  $n$  de Manning. Sur ces sites, les valeurs de  $n$  qui ont donné les meilleurs résultats à la majorité des transects ont été sélectionnées. Au site 50 (débit mesuré :  $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ ), il y a un seuil entre la deuxième et la troisième section qui élève le niveau d'eau en amont. Étant donné que cette structure n'a pas été prise en compte dans le modèle hydraulique, le modèle sous-estime le niveau d'eau à la première et la seconde section. Au site 26 (débit mesuré :  $0,004 \text{ m}^3/\text{s}$ ), on soupçonne que l'incapacité du modèle à reproduire adéquatement le niveau d'eau observé à la plupart des transects pourrait être due à plusieurs facteurs. Elle pourrait être liée, entre autres, à la

présence d'une structure hydraulique (seuil) en aval du tronçon modélisé qui affecte le niveau d'eau en amont, et/ou à des erreurs dans les mesures du débit, étant donné que le débit est très faible à ce site. En fait, la vitesse maximale mesurée au site 26 était de 0,06 m/s avec une incertitude de l'instrument de  $\pm 0,016$  m/s et le vélocimètre a donné des valeurs positives à seulement trois verticales des sections transversales. Aux sites 29, 33 et 46, il a été possible d'améliorer les résultats d'étalonnage de tous les transects en augmentant le coefficient de rugosité  $n$  de Manning à des valeurs supérieures à 0,2. Dans ces cas, le modèle compensait probablement certaines erreurs dues aux données bathymétriques ou à la présence d'une structure en aval qui affecte le niveau d'eau en amont. Au cours de la simulation de l'inondation récurrente de 2 ans, les coefficients de rugosité de ces tronçons de rivière ont été réduits à 0,1 (la valeur maximale rapportée par Chow, 1959). Les résultats d'étalonnage de ces sites sont présentés à la figure 2.7 avec le coefficient  $n$  de Manning qui a donné l'erreur absolue relative la plus faible sur la majorité des transects.

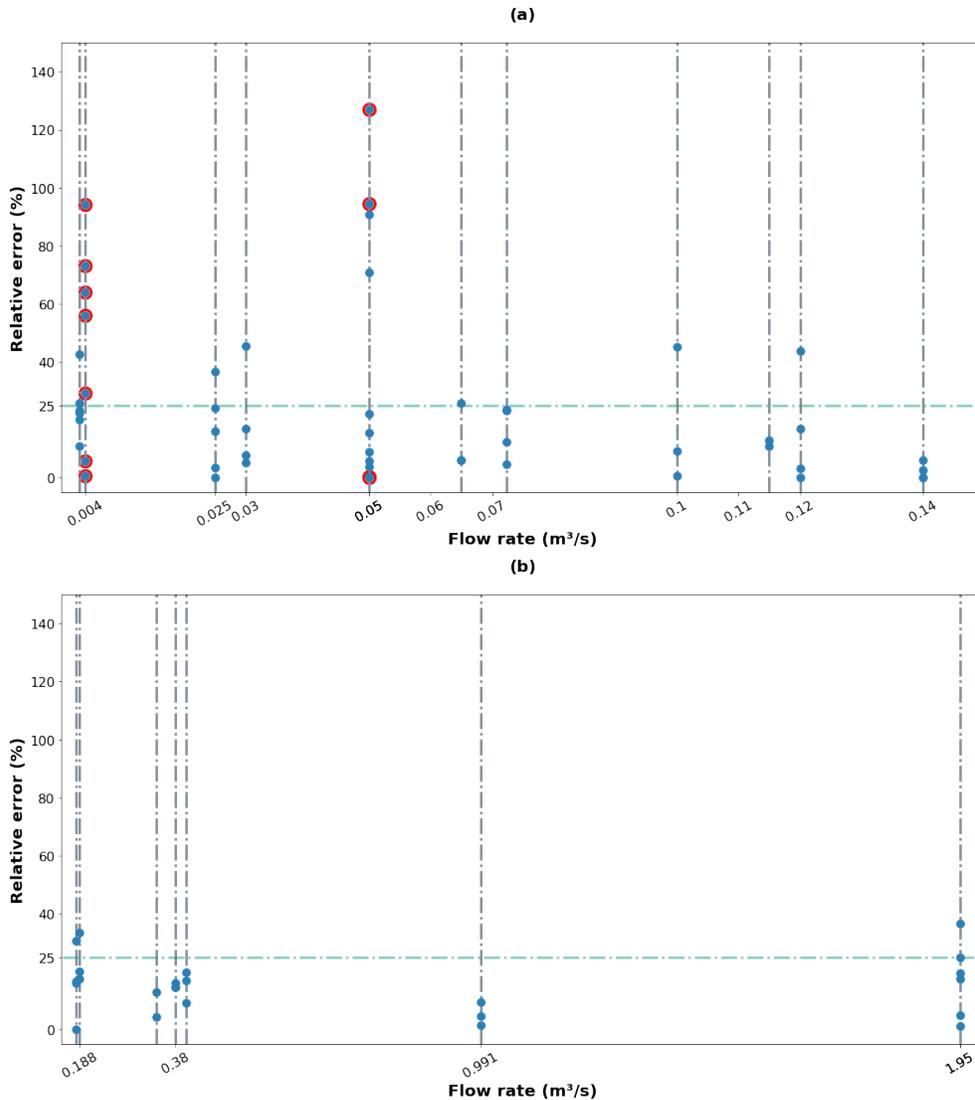


Figure 17. Erreur relative entre les niveaux observés et simulés en fonction du débit mesuré pour a) les sites avec des débits mesurés inférieurs à  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$  et b) les sites avec des débits mesurés supérieurs à  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 3 Méthode géomatique/géomorphologique

Quoi que le consensus ne soit pas généralisé, certains auteurs (Mersel, 2013; Scherek & Yakel, 1993; USDA, 2009) indiquent une adéquation et une similitude entre le niveau plein-bord (en : *bankfull*, identifiable grâce aux données de profil d'élévation) et la ligne des hautes-eaux (en : *ordinary high water mark* ou OHWM) particulièrement dans le contexte de cours d'eau en milieu non-arides et non-éphémères. La méthodologie géomatique, se voulant complémentaire aux deux méthodes présentées précédemment, repose sur la détection de l'élévation qui correspond au niveau de la ligne des hautes eaux (ou ici, le niveau plein-bord) en faisant appel aux données LiDAR matricielles, à des méthodes et algorithmes géomatiques et des concepts géomorphologiques.

D'abord, à chacun des sites de l'étude, une ligne centrale, correspondante au talweg, a été tracée en s'assurant de suivre les pixels LiDAR les plus bas au centre de la cuve formant le lit du cours d'eau (Figure 18 – Ligne bleue). Un tel processus pourrait être automatisé à partir d'une approche rigoureuse d'accumulation de flux (en : *Flow Accumulation*) À partir de cette ligne sont tracés des transects perpendiculaires d'une largeur de 200 m (soit 100 m de chaque côté) et ce, à chaque 5 m de distance (Figure 18 – Ligne rouge). La distance de 200 m vise à s'assurer que toute l'information nécessaire soit disponible pour bien détecter la cassure correspondant au niveau plein-bord et est également établie en fonction du type de cours d'eau en analyse dans cette étude. Quant à lui, l'écart de 5 m entre chaque transect se veut une valeur de compromis entre la résolution linéaire dans l'axe du talweg de la LHE résultante et le temps de traitement requis.

Sur ces transects, des points positionnés systématiquement à chaque mètre, d'une extrémité du transect à l'autre, sont utilisés afin d'extraire les valeurs d'élévation LiDAR. Ce sont ces points qui servent de structure élémentaire pour déterminer des profils transversaux (Figure 18 – Points jaunes). La distance séparant ces points correspond à la résolution planimétrique du LiDAR. Il serait donc inutile de vouloir rapprocher ces derniers, deux points contigus capteraient alors la même valeur d'élévation. Cela dit, dans l'éventualité où une altération de la donnée paraît acceptable, une approche par interpolation permettrait de réduire l'écart d'un mètre à une valeur plus petite (N.B. ce qui n'a pas été fait dans cette étude).

Ensuite, pour chacun de ces profils, l'approche décrite dans les prochaines lignes est utilisée :

1. D'abord, l'élévation du point correspondant au point central (c.-à-d. le talweg) est extraite;
2. Partant de ce niveau de référence, la lame d'eau est incrémentée en boucle d'une hauteur de 5 cm, valeur bien en-deçà de la variabilité naturelle en Z des données LiDAR ( $\pm 15$  cm);
3. À chaque boucle, la largeur de la surface mouillée est mesurée (avec une résolution horizontale de 1 m). Connaissant la largeur mouillée et la hauteur de la lame d'eau cumulée, il est alors possible de déterminer un ratio largeur/profondeur (RLP) ;
4. Dès lors que tous les RLP ont été mesurés entre les valeurs d'élévations minimales et maximales du profil à un pas de 5 cm, l'algorithme recherche le premier niveau d'eau cumulée qui présente la caractéristique d'inverser le sens du RLP, tel que présenté en figure 19 et transposé au profil transversal en figure 20.

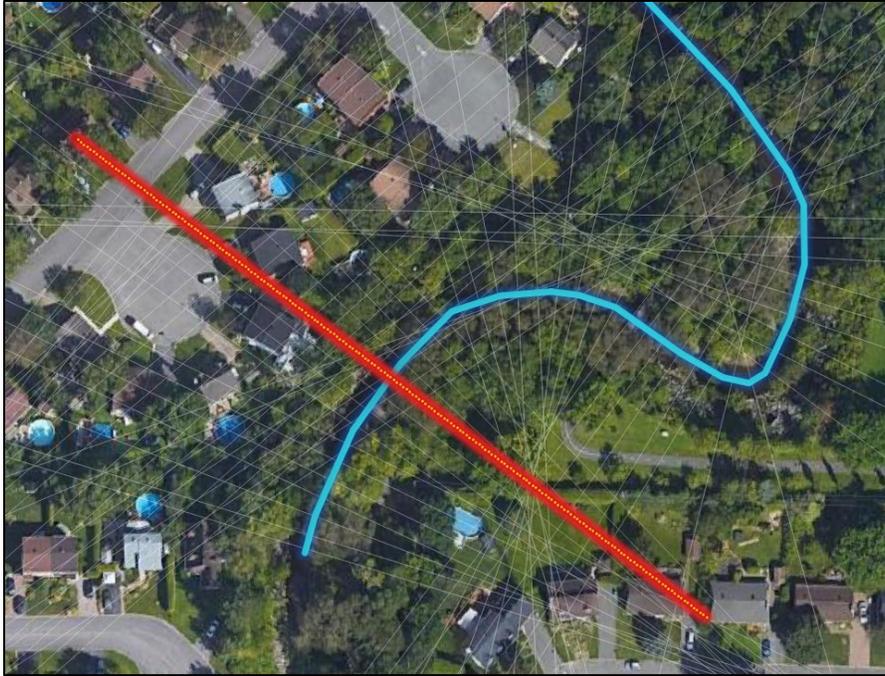


Figure 18 : Structure élémentaire pour la détection du niveau plein-bord à chaque transect. (En bleu : le talweg, en rouge : un transect de 200 m, en jaune : les points du transect espacés chacun de 1 m)

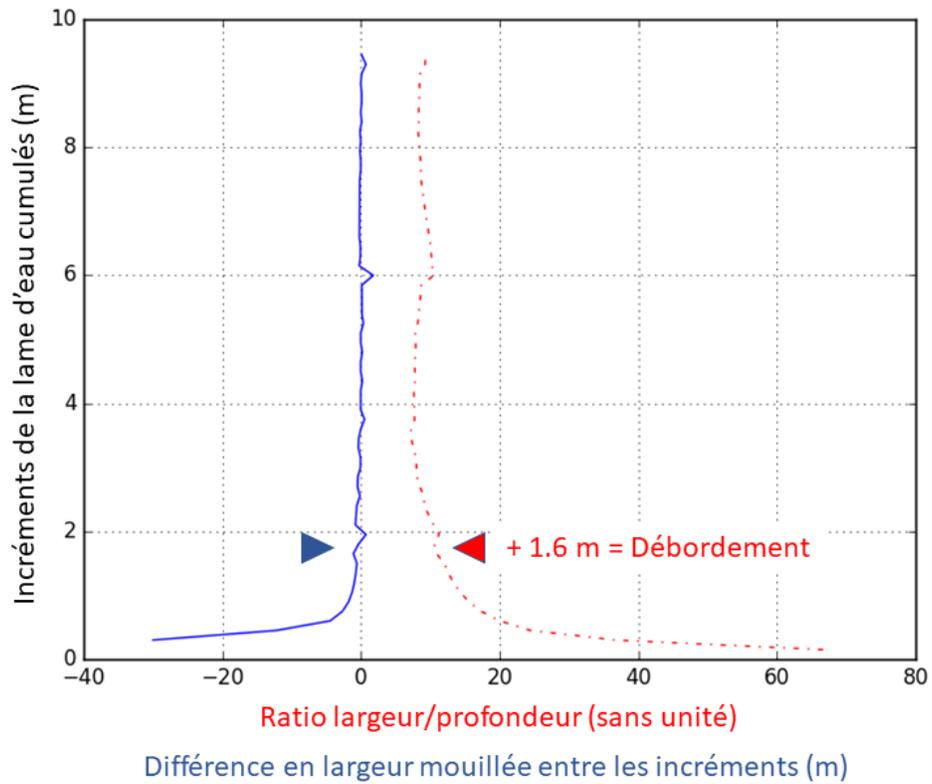


Figure 19 : Détection du niveau d'eau correspondant à l'inversion du RLP (donc du débordement)

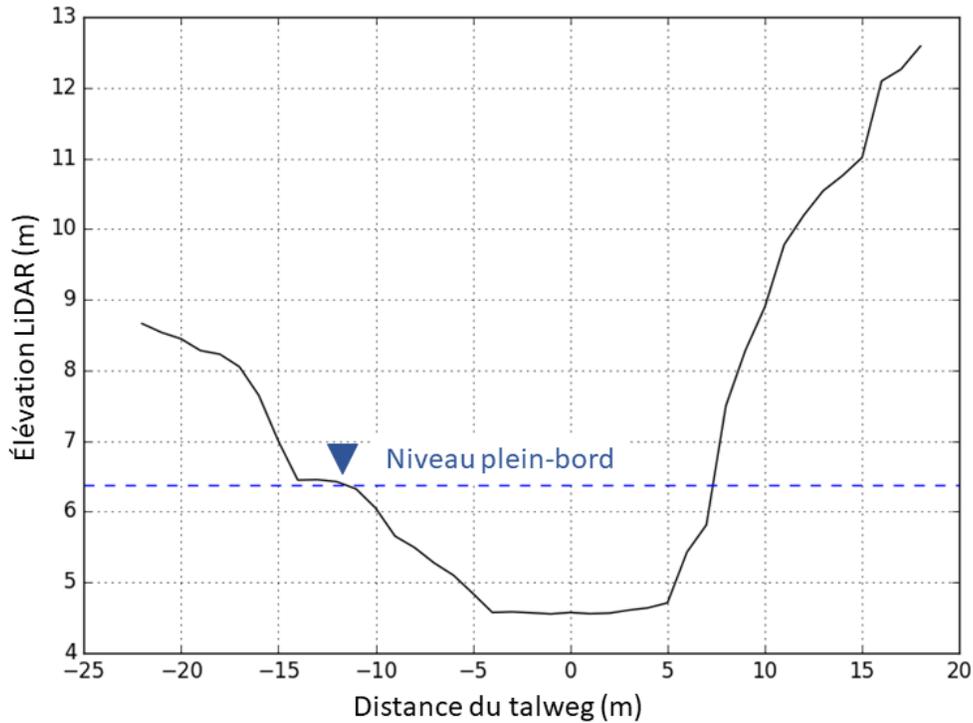


Figure 20 : Report du niveau d'eau détecté comme plein-bord sur le profil transversal correspondant

En somme, cela signifie que pour la première fois, partant du talweg, la largeur de la surface mouillée présente une croissance plus rapide que la hauteur d'eau cumulée, ce qui, en d'autres mots, signifie que l'élargissement de la surface mouillée est soudain et rapide proportionnellement au niveau d'eau cumulé et que ceci équivaut à détecter un débordement. Le niveau ainsi identifié est celui du débordement ce qui signifie que pour trouver le niveau pré-débordement, il faut retirer un incrément du niveau, donc 5 cm. Un exemple est fourni dans le tableau 9. Ce niveau pré-débordement (niveau LHE associé au transect) est capturé à chaque transect et conservé dans un vecteur de données pour l'étape suivante ;

5. En ne conservant à chaque transect que les points qui ont une élévation égale ou inférieure au niveau pré-débordement (LHE) identifié (Figure 21 – Points mauves), on peut alors déterminer un squelette de la LHE locale pouvant être présenté sur une carte et si nécessaire, entouré d'une  $\alpha$ -shape (Figure 21 – Polygone noir).

Tableau 9 : Exemple simple de suivi du RLP et de la détermination du niveau plein-bord. (N.B. L'épaisseur de la lame d'eau cumulée débute à la surface de l'eau, au moment de l'acquisition des données LiDAR et ne doit pas être assimilée à une profondeur d'eau.

Incrément Z cumulé	Largeur	Ratio Largeur mouillée/Lame d'eau cumulée (profondeur)	Cassure ?
5 cm	1.2 m	N/A	N/A (Parce que 1 <sup>er</sup> incrément)
10 cm	1.22 m	→ $1.22 / 0.10 = 12.2$ (Départ)	NON
15 cm	1.25 m	↓ $1.25 / 0.15 = 8.33$ ( $\Delta = -3.87$ )	NON
20 cm	1.28 m	↓ $1.28 / 0.20 = 6.4$ ( $\Delta = -1.93$ )	NON
25 cm	1.4 m	↓ $1.4 / 0.25 = 5.6$ ( $\Delta = -0.8$ )	NON
30 cm	1.65 m	↓ $1.65 / 0.3 = 5.5$ ( $\Delta = -0.1$ )	NON
35 cm	1.71 m	↓ $1.71 / 0.35 = 4.89$ ( $\Delta = -0.61$ )	NON
40 cm	1.77 m	↓ $1.77 / 0.40 = 4.425$ ( $\Delta = -0.465$ )	NON
45 cm	2.5 m	↑ $2.5 / 0.45 = 5.55$ ( $\Delta = +1.125$ , Inversion de sens)	<b>OUI</b> <b>(Donc plein-bord à 40 cm, pré-débordement)</b>



Figure 21 : Squelette de la LHE avec une  $\alpha$ -shape l'entourant. (Les points noirs correspondent aux niveaux LHE hydrauliques)

La méthodologie présentée ci-dessus a été transposée en outils ArcGIS 10.7 et également sous la version ArcGIS Pro. Les outils ArcGIS sont complétés par des fonctionnalités d'analyses qui sont disponibles via Anaconda et des notebooks Jupyter, interfaces conviviales pour la programmation Python en ligne.

Dans l'ensemble, l'approche de détermination de la LHE géomatique/géomorphologique proposée dans ce projet démontre un bon potentiel, particulièrement pour offrir un premier aperçu rapide de la situation, avant même de devoir se rendre sur le terrain. En comparaison avec les méthodes botaniques et hydraulique, les LHE identifiées se montrent concordantes, avec bien sur une certaine variabilité, soit associable à l'algorithme et ses paramètres, soit dû à un biais inhérent aux données LiDAR en entrée.

Les raisons pouvant expliquer les différences entre les approches sont multiples et parfois s'entrecroisent, rendant la rationalisation des différences complexe. Parmi ces raisons potentielles, citons la résolution variable de la donnée LiDAR (c.-à-d. la densité sous-jacente des points LiDAR utilisés pour générer la matrice de 1 m de résolution planimétrique), la présence d'artefacts d'interpolation dans la version matricielle du LiDAR, l'incapacité actuelle de l'approche à faire

abstraction des bancs et îles, voire des rochers de grande taille (c.-à-d. l'approche travaille transect par transect et n'est pas spatialement distribuée comme l'est la méthode hydraulique). Ajoutons à cela le constat que ce ne sont pas tous les auteurs qui reconnaissent le lien entre le niveau plein-bord et la LHE.

Une compilation des niveaux estimés par l'approche géomatique en comparaison aux autres approches, a permis de déterminer l'adéquation des différentes approches et le niveau de différence en Z des LHE identifiées. La figure 22 présente les boxplots des différences mesurées (écart interquartile – IQR - et valeur médiane) sur l'ensemble des transects communs aux trois méthodes et ce par catégorie de site (agricole, forestier, urbain). Cet exercice permet d'estimer l'importance des écarts entre la LHE géomatique/géomorphologique et ses corollaires botaniques et hydrauliques.

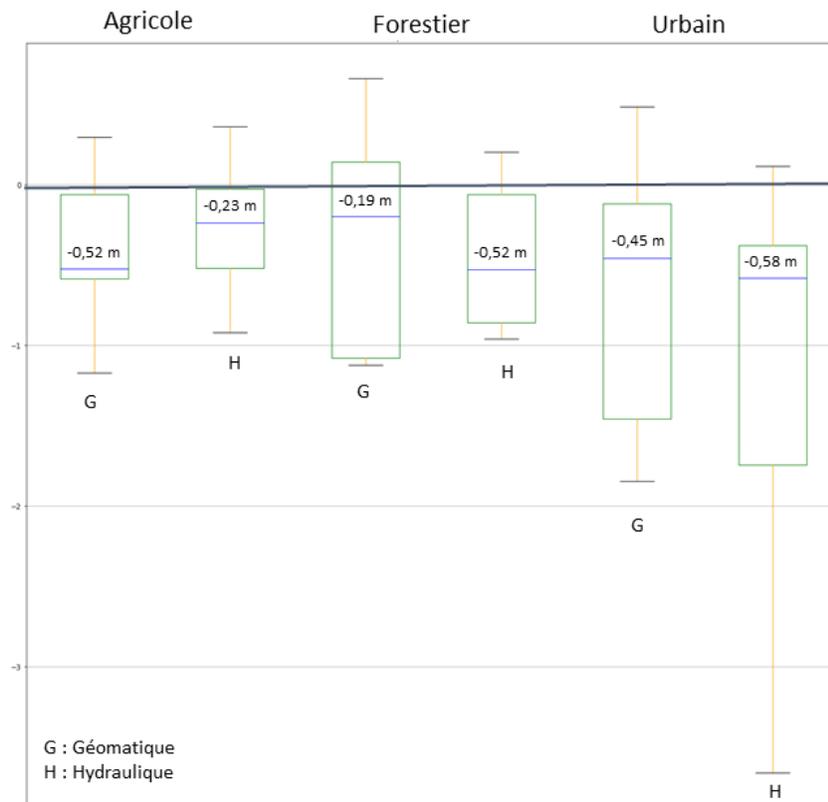


Figure 22 : Écarts entre les élévations correspondantes aux LHE mesurées par les méthodes géomatiques (G), hydrauliques (H) et botaniques (trait noir). (N.B. La valeur de référence utilisée pour la comparaison est, par convention, la méthode botanique)

Au vu des résultats, il semble que la méthode géomatique se montre globalement assez efficace tant en milieu agricole, forestier ou urbain. Cela pourrait être en partie explicable par le fait que la

méthode géomatique peut s'adapter aux changements morphologiques locaux et est fortement orientée données (en : *data driven*) ce qui signifie qu'avec des données récentes (comme les données LiDAR) elle sera plus au fait de prendre en compte les réalités terrain et leurs récentes altérations. Dans l'ensemble des sites, un fort niveau de similitude est observable entre les approches hydrauliques et géomatiques. Cela est certainement lié au fait que comme l'approche hydraulique, quoique d'une manière différente, l'approche géomatique repose sur une analyse de la morphologie de la surface. Cette similarité est observable dans la figure 22 dans laquelle les écarts entre les deux méthodes sont faibles. Enfin, notez que de manière globale, il semble que les approches géomatiques et hydrauliques estiment des LHE plus basses, donc *de facto* moins larges que celles relevées par l'approche botanique.

Au niveau stratégique, les avantages de l'approche géomatique/géomorphologique sont multiples. Elle est **simple**, facilement conceptualisable et **compréhensible pour tous** (analogie du trop-plein dans un verre d'eau). De plus, contrairement aux autres approches, elle ne nécessite **pas de déplacements sur le terrain**, peut-être complétée par **une seule personne**, se déploie sur **toutes les tailles de tronçons**, est **indépendante des conditions de terrain** et est extrêmement **rapide à exécuter**. L'économie de ressources et de temps est donc considérable et non-négligeable.

En contrepartie, c'est une approche qui repose et dépend énormément sur la quantité, l'actualité, la granularité et la qualité des données LiDAR. Advenant un manquement notable dans l'un de ces aspects, il est probable que l'approche présentera des biais et des lacunes qu'il faudra anticiper. Il faut donc savoir se montrer parcimonieux dans son utilisation et dans l'analyse de ses résultats. Néanmoins, elle constitue, comme cela fût stipulé en début de chapitre, un excellent premier aperçu de la situation en appui aux approches officielles.

Considérant les travaux présentés dans le présent rapport, l'équipe ayant développé l'approche géomatique considère qu'il est de mise de faire appel aux trois méthodes présentées en synergie, afin d'exploiter les forces et complémentarités de chacune d'elles.

## 4 Première comparaison entre les méthodes botanique et hydrologique/hydraulique

La comparaison des deux méthodes a été réalisée en considérant la distance latérale entre les 2 méthodes. Cette distance latérale a été mesurée sur la plus courte ligne reliant la position de la méthode botanique et l'axe principal de la rivière. Les résultats de l'analyse comparative sont les suivants : Dans les figures 23 à 25, la ligne pointillée noire représente le niveau estimé par la ligne

botanique et est toujours situé à la distance de 0 m. Les lignes horizontales bleues, vertes et rouges représentent respectivement la position du niveau de la crue de récurrence 2 ans par rapport à la méthode botanique, et la position de ses limites inférieure et supérieure de l'IC à 95 %. Dans les zones forestières (figure 23), avec 4 sites analysés et 12 positions de la LHE botanique disponibles, le niveau de la crue de récurrence 2 ans est plus proche du centre de la rivière que celui établi par la méthode botanique pour neuf d'entre eux (75%). Dans les zones agricoles (Figure 24), 21 sur 30 (70 %) des niveaux établis par la méthode botanique sont situées plus loin du centre de la rivière que les niveaux établis par la méthode hydraulique, et dans le cas des zones urbaines (figure 25), 16 sur 20 (80 %) des niveaux établis par la méthode botanique sont plus à l'intérieur des terres que le niveau établi avec la crue de récurrence 2 ans. Ces résultats montrent qu'en fonction de l'environnement, il y a une forte tendance à la sous-estimation ou à la surestimation de la méthode botanique par rapport à la méthode hydraulique. Dans les zones urbaines et forestières, la position du niveau de la crue de récurrence 2 ans par la méthode botanique a tendance à être plus à l'intérieur des terres que celui établi par la méthode hydraulique. Dans les zones agricoles, le contraire est observé. C'est la ligne d'inondation récurrente de 2 ans qui est plus souvent plus à l'intérieur des terres que la position établie par la méthode botanique.

La distance entre les deux approches varie entre 0,08 m (site 45) et 26,60 m (site 58). Dans les zones agricoles, la distance minimale observée est de 0,08 m (site 45), et le maximum est de 6,94 m (site 42). En zones urbaines, la distance varie entre 0,13 m (site 46) et 26,60 m (site 58). Enfin en zone forestière, la distance varie entre 1,31 m (site 6) et 7,52 m (site 49)

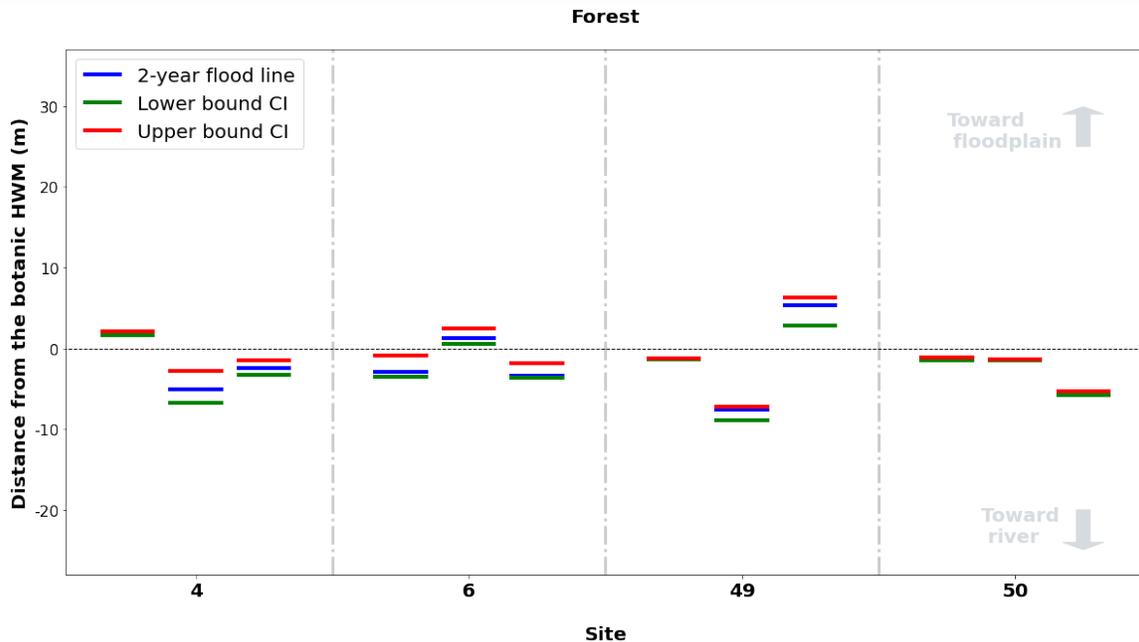


Figure 23. Distance relative entre le niveau associé à la crue de récurrence 2 ans, les intervalles de confiance à 95% et la méthode botanique (experte) pour les tronçons en milieu forestier.

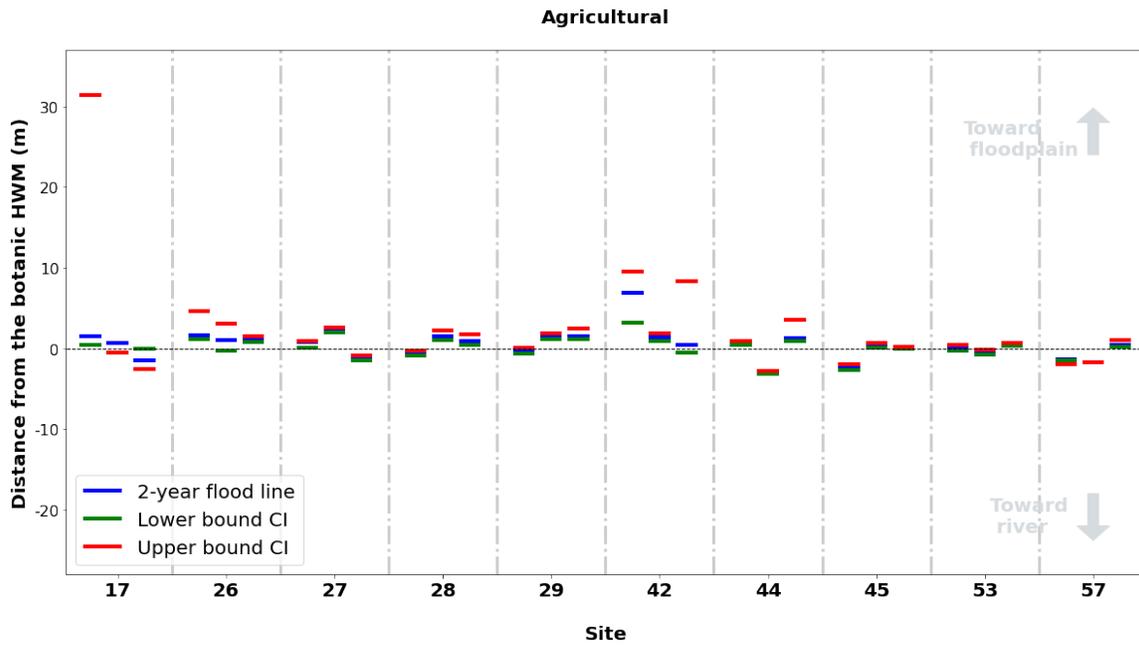


Figure 24. Distance relative entre le niveau associé à la crue de récurrence 2 ans, les intervalles de confiance à 95% et la méthode botanique (experte) pour les tronçons en milieu agricole.

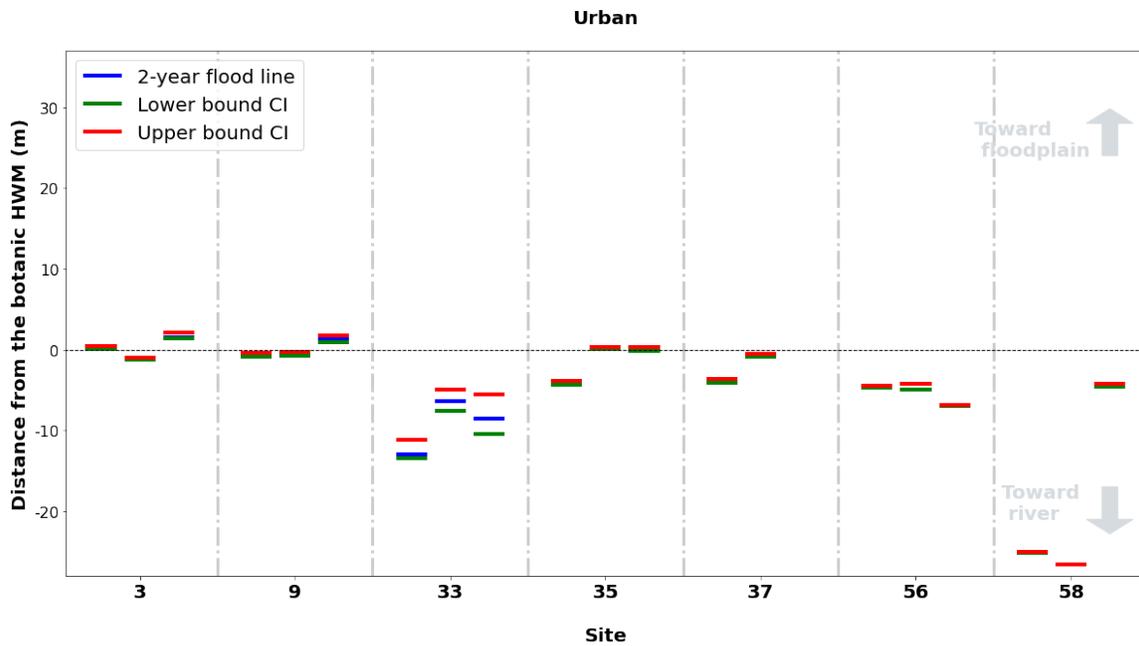


Figure 25. Distance relative entre le niveau associé à la crue de récurrence 2 ans, les intervalles de confiance à 95% et la méthode botanique (experte) pour les tronçons en milieu urbain.

## Références

- Bonham, C.D. (1989). *Measurements for terrestrial vegetation*. Wiley, New York
- Boucher, M.-È. et J. Francoeur (2013). Détermination des cotes de crues des rivières du Berger, des Commissaires et des Sept Ponts. Québec, Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ).
- Boucher, M.-È., et al. (2013). Détermination des cotes de crues de la rivière du Cap Rouge. Québec, Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ).
- Bourgeois, B., E. Gonzalez, A. Vanasse, I. Aubin & M. Poulin. (2016) Spatial processes structuring riparian plant communities in agroecosystems: implications for restoration. *Ecological Applications* 26: 2103-2115
- Brouillet, L., F. Coursol, S.J. Meades, M. Favreau, M. Anions, P. Bélisle et P. Desmet. (2010) VASCAN, la Base de données des plantes vasculaires du Canada. [En ligne] <http://data.canadensys.net/vascan/> (consultée le 2022-04-15)
- Box, G. E. P. and Cox, D. R. (1964). An analysis of transformations, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 26, 211-252.
- Burn, D. H. (1997). "Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures." *Journal of Hydrology* **202**(1): 212-230.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. New York, McGraw-Hill.
- David W. Roberts (2019). *labdsv: Ordination and Multivariate Analysis for Ecology*. R package version 2.0-1.
- Dalrymple, T. (1960). Flood-frequency analyses, *Manual of Hydrology: Part 3. Water Supply Paper*.
- Gage, E.A., Cooper, D.J., Bultema, B., McKernan, C. et R. Lichvar. (2016) *Developing a field-testes wetland indicator rating for blue spruce (Picea pungens) in the southern Rocky Mountains*. *Wetlands* 36:111-120.
- Gilbert, H. (1995) *Corrélation entre la cote de récurrence de deux ans et la limite botanique*. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des politiques du secteur municipal, Québec, 56 pp.
- Gilrich, J. J. et Lichvar, R. W. (2014) *Examining Discrepancies among Three Methods used to make Hydrophytic Vegetation Determinations for Wetland Delineation Purposes*. *Wetlands Regulatory Assistance Program (WRAP)*, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, 17 pp.
- Hastie, T. et R. Tibshirani (1986). "Generalized Additive Models." *Statist. Sci.* **1**(3): 297-310.
- Gage, E.A., Cooper, D.J., Bultema, B., McKernan, C. et R. Lichvar. (2016) *Developing a field-*
- Hothorn, T., Bretz F. et Westfall P. (2008). Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical Journal* 50(3): 346-363.
- Hosking, J. R. M. et J. R. Wallis (1997). *Regional frequency analysis an approach based on L-moments*. Cambridge etc., Cambridge University Press.
- Lachance, D., G. Fortin et G. Dufour Tremblay (2021). *Identification et délimitation des milieux humides du Québec méridional – décembre 2021*, Québec, ministère de l'Environnement et de

la Lutte contre les changements climatiques, Direction adjointe de la conservation des milieux humides, 70 p. + annexes, [En ligne] <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rives/guide-identif-dellimit-milieux-humides.pdf>.

Lapointe, M. et Jutras, S. (2021) Revue de littérature sur les méthodologies d'inventaire permettant un diagnostic de milieu humide ou terrestre : Analyse des méthodes utilisées pour la détermination de la végétation hygrophile. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction de la protection des espèces et des milieux naturels, Québec, 24 pp.

Length, R.V. (2021). emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.7.0.

Lichvar, R.W., J. Gillrich et W. Ochs. 2011. Discrepancies in Hydrophytic Determinations Produced by Three Vegetation Formulas Used for Wetland Delineations. *Wetlands*, 31: 603-611. Doi: 10.1007/s13157-011-0166-7.

Lichvar, R.W., M. Butterwick, N.C. Melvin et W.N. Kirchner. 2014. The National Wetland Plant List: 2014 Update of Wetland Ratings. *Phytoneuron* 2014-41: 1-42.

Marra, G. et S. N. Wood (2011). "Practical variable selection for generalized additive models." *Computational Statistics & Data Analysis* **55**(7): 2372-2387.

Mersel, M. K. (2013). *The Ordinary High Water Mark : Concepts, Research, and Applications*. 20. Michigan Flora Online. A. A. Reznicek, E. G. Voss, & B. S. Walters. February 2011. University of Michigan. Web. October 10, 2020. <https://michiganflora.net/>

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec, 2008, version révisée 2015. Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. Note explicative sur la ligne des hautes eaux : la méthode botanique experte, 9 pages + annexes.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec, 2018. Base de données des zones inondables. [En ligne.] URL: [ftp://ftp.mddelcc.gouv.qc.ca/DONNEES\\_OUVERTES/Base\\_donnees\\_zones\\_inondables/BDZI.gdb.zip](ftp://ftp.mddelcc.gouv.qc.ca/DONNEES_OUVERTES/Base_donnees_zones_inondables/BDZI.gdb.zip)

Naiman, R. J., H. Décamps, et M. E. McClain. 2005. *Riparia: Ecology, Conservation and Management of Streamside Communities*. Elsevier/Academic Press, San Diego, 130 pp.

USDA, NRCS. 2020. The PLANTS Database (<http://plants.usda.gov>, 10 October 2020). National Plant Data Team, Greensboro, NC 27401-4901 USA.

Noto, L. et G. la Loggia (2009). "Use of L-Moments Approach for Regional Flood Frequency Analysis in Sicily, Italy." *Water Resources Management* **23**: 2207-2229.

Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., R Core Team (2021) nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-152.

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Roberts, D. W. (2019). labdsv: Ordination and Multivariate Analysis for Ecology. R package version 2.0-1.

Scherek, J., & Yakel, G. (1993). OHWL Determinations (p. 10). [https://files.dnr.state.mn.us/waters/surfacewater\\_section/hydrographics/ohwl.pdf](https://files.dnr.state.mn.us/waters/surfacewater_section/hydrographics/ohwl.pdf)

Tiner, R. W. (1993) Using Plants as Indicators of Wetland. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*. 144: 240-253.

Tiner, T. W. (2016). *Wetland Indicators A Guide to Wetland Formation, Identification, Delineation, Classification, and Mapping* (2nd ed.). CRC Press, Boca Raton, London, New York, 630 pp.

USDA. (2009). *Stream Classification using the Rosgen System* (p. 8). USDA.  
[https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_024290.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_024290.pdf)

Wood, S. (2001). "mgcv: GAMs and generalized ridge regression for R." *R News* **1**.

Wood, S. (2006). *Generalized Additive Models: An Introduction With R*.