

Indice de qualité de l'habitat de la salamandre à quatre orteils au Québec

Rapport technique – Décembre 2025



Coordination et rédaction

Cette publication est le fruit d'une collaboration entre le Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (CERFO) et la Direction des espèces fauniques menacées ou vulnérables (DEFAMV) du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). L'équipe du Ministère a mandaté le CERFO, orienté les travaux et collaboré par son expertise aux différentes phases du projet, y compris la rédaction, la révision et l'édition du rapport final. L'équipe du CERFO était chargée du développement méthodologique, de la création de l'indice de qualité de l'habitat et de la rédaction du rapport. La publication a été produite par la Direction des communications du MELCCFP.

Photographie de la page couverture :

Salamandre à quatre orteils, © Scott Gillingwater.

Autres photographies :

Page 2, figure 1 : Salamandre à quatre orteils (*Hemidactylium scutatum*), © MELCCFP.

Page 7, figure 3 : Habitat typique de la salamandre à quatre orteils, © ELISO.

Dépôt légal – 2025

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Titre : Indice de qualité de l'habitat de la salamandre à quatre orteils au Québec

Format : PDF

ISBN : 978-2-555-02632-2

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec – 2025

Équipe de réalisation

Rédaction

Xavier Gallagher-Duval, biologiste

Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO)

Mathieu Varin, géomaticien, M. Sc.

CERFO

Jean Fink, biologiste

CERFO

Collaboration

Patrick Charbonneau, biologiste, M. Sc.

Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), Direction des espèces fauniques menacées ou vulnérables (DEFAMV)

Catherine Doucet, biologiste, M. Sc.

MELCCFP, DEFAMV

Yohann Dubois, biologiste, M. Sc.

MELCCFP, DEFAMV

Jérôme Lemaître, biologiste, Ph. D.

MELCCFP, DEFAMV

Révision

Patrick Charbonneau, biologiste, M. Sc.

MELCCFP, DEFAMV

Remerciements

Nous remercions les membres des directions de la gestion de la faune du MELCCFP qui ont lu et commenté ce document.

Référence à citer

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, DE LA FAUNE ET DES PARCS et CENTRE D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE EN FORESTERIE DE SAINTE-FOY INC. (2025). *Indice de qualité de l'habitat de la salamandre à quatre orteils au Québec, Rapport méthodologique*, gouvernement du Québec, Québec, Québec, 23 p.

Registre du document et des mises à jour

Date	Version	Nature du document/des modifications	Chargé de projet
Décembre 2025	01	Première version officielle	Jérôme Lemaître

Résumé

La salamandre à quatre orteils (*Hemidactylium scutatum*) est une espèce susceptible d'être désignée menacée ou vulnérable au Québec. Parmi les menaces qui pèsent sur l'espèce, on compte l'étalement urbain, l'exploitation des tourbières, la production de canneberges et l'exploitation forestière. Peu d'informations sont disponibles pour définir la tendance des populations de la salamandre à quatre orteils dans la province. L'objectif du présent rapport consiste à présenter un indice de qualité de l'habitat (IQH) qui permettra de mieux comprendre les habitats qu'elle fréquente. Cet IQH devrait permettre d'orienter les inventaires ainsi que les actions de conservation sur le territoire québécois. L'approche est basée sur les variables d'habitats documentées dans la littérature pour mettre au point un IQH, soit les jours de croissance, le couvert forestier (divisé en classes d'essence et en codes de terrain), l'indice d'humidité topographique, l'humidité du sol et la proximité de milieux humides et aquatiques. Ces données ont permis de calculer un IQH et de produire une carte de qualité de l'habitat propice à la salamandre à quatre orteils selon un gradient de qualité faible à élevée. Les variables explicatives de la présence de la salamandre à quatre orteils les plus importantes sont les classes d'essences, les codes de terrain, l'indice d'humidité topographique et la proximité de milieux humides. Plusieurs éléments d'amélioration de l'IQH sont identifiés, dont l'utilisation des données lidar (*Light Detection and Ranging*), ce qui permettra de raffiner l'IQH dans le futur.

Table des matières

Équipe de réalisation	iii
Résumé	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
1. Introduction	1
2. Notions d'écologie	2
2.1 Description	2
2.2 Répartition	2
2.3 Habitat	3
2.3.1 Habitat terrestre	3
2.3.2 Habitat de ponte	3
3. Méthodologie	5
3.1 Aire d'étude	5
3.2 Exploration et regroupement des données	5
3.2.1 Approche	5
3.2.2 Variables retenues	6
3.2.3 Données utilisées	6
3.2.4 Création des classes	7
3.3 Calcul de l'indice de qualité de l'habitat (IQH)	11
4. Résultats	13
5. Discussion	18
6. Références	21

Liste des tableaux

Tableau 1. Composition et signification des quatre classes définies pour la variable du groupe d'essences et des valeurs de codes d'essences possibles	9
Tableau 2. Codes de terrain des 166 points d'observation qui ne comportent pas de valeur de groupe d'essences	10
Tableau 3. Valeurs des différentes variables utilisées dans l'indice de qualité de l'habitat (IQH) présentes sous les deux points d'observations de salamandre à quatre orteils	16

Liste des figures

Figure 1.	Salamandre à quatre orteils (<i>Hemidactylium scutatum</i>)	2
Figure 2.	Représentation de l'aire de répartition (en jaune) des polygones écoforestiers dont la période de croissance a une durée de plus de 180 jours pour l'ensemble du territoire du Québec	5
Figure 3.	Habitat typique de la salamandre à quatre orteils	7
Figure 4.	Pourcentage des observations comportant les différents codes d'essences dans l'attribut « groupe d'essences » (GR_ESS) des polygones écoforestiers. Les codes d'essences de la classe 1 sont encadrés en rouge et ceux de la classe 2, en vert. Le code FO, bien qu'affiché dans l'encadré vert, fait partie de la classe 1.	8
Figure 5.	Distribution des valeurs de l'indice d'humidité topographique (TWI) maximales, minimales et moyennes dans un rayon de 50 m autour des observations de salamandre à quatre orteils	10
Figure 6.	Zone où le nombre de jours de la période de croissance n'était pas connu (en jaune)	11
Figure 7.	Probabilité de présence de la salamandre à quatre orteils sur l'aire d'étude	13
Figure 8.	Valeurs de l'indice de qualité de l'habitat (IQH) pour les observations de salamandre à quatre orteils au Québec	14
Figure 9.	Représentation des valeurs de l'indice de qualité de l'habitat (IQH) dans un polygone écoforestier contenant deux observations de salamandre à quatre orteils	15
Figure 10.	A) IQH normalisé (final) du polygone écoforestier où deux salamandres à quatre orteils ont été observées. B) Classes d'essences autour du polygone écoforestier... ..	16
Figure 11.	Probabilité de présence des salamandres à quatre orteils à la suite de la transformation de l'indice de qualité de l'habitat (IQH normalisé [final]).....	17
Figure 12.	A) Entités linéaires trouvées dans l'indice de qualité de l'habitat (IQH normalisé [final]). B) Entités linéaires provenant des classes d'essences.....	19
Figure 13.	A) Lignes formées par des valeurs élevées de l'indice de qualité de l'habitat (IQH normalisé [final]). B) Lignes formées des polygones écoforestiers étroits.....	19
Figure 14.	Distribution du nombre d'observations de salamandre à quatre orteils dans les différentes classes de densité du couvert végétal	20

1. Introduction

La salamandre à quatre orteils (*Hemidactylium scutatum*) figure sur la liste des espèces susceptibles d'être désignées menacées ou vulnérables en vertu de la *Loi sur les espèces menacées ou vulnérables* du Québec (LEMV) (RLRQ, c. E-12.01). Parmi les menaces qui pèsent sur elle, on trouve l'étalement urbain et l'exploitation de tourbières pour la production de tourbe ou de canneberges, qui occasionnent la fragmentation et la perte d'habitats. L'exploitation forestière lui est également néfaste, particulièrement à cause de l'ouverture du couvert forestier qui diminue le taux d'humidité dans le sol et à cause de la compaction des sols par le passage de la machinerie qui perturbe les conditions de drainage du sol. De plus, cette espèce est particulièrement sensible à toute modification ou détérioration de son habitat. Comme elle respire seulement par la peau, elle ne tolère pas les milieux secs et elle a besoin d'être en contact avec une eau bien oxygénée (MELCCFP, 2024a).

Or, peu de renseignements sont disponibles pour définir avec précision la tendance des populations de salamandres à quatre orteils au Québec. Malgré les observations des dernières années, sa situation semble incertaine, car les sites qu'elle fréquente sont isolés et présentent de faibles superficies d'habitats propices à son maintien. Par ailleurs, certains sites connus de l'espèce ont été détruits au profit du développement urbain (Gouvernement du Québec, 2025b).

Dans l'optique de mieux la connaître pour mieux la protéger, il est important de bien comprendre les habitats qu'elle fréquente. L'objectif du présent rapport consiste à présenter l'élaboration d'un indice de qualité de l'habitat (IQH)¹ pour la salamandre à quatre orteils sur le territoire du Québec. Un IQH permet de cartographier le potentiel de l'habitat à une échelle spatiale adaptée au domaine vital de l'espèce. Il prend en compte le potentiel de présence d'un milieu de reproduction, mais également la qualité des habitats en périphérie de ce milieu grâce à certaines variables environnementales.

Cet IQH devrait permettre d'orienter les inventaires ainsi que les actions de conservation sur le territoire québécois.

Dans un premier temps, une description de l'espèce, de son habitat et de sa répartition au Québec est présentée. Par la suite, les variables environnementales nécessaires à l'élaboration de l'IQH sont identifiées. L'IQH est ensuite décrit. Enfin, ses avantages et ses limites sont abordés.

¹ Les IQH intègrent généralement plusieurs variables déterminantes pour la sélection d'habitats et permettent d'évaluer la qualité potentielle d'un habitat pour une espèce. Le résultat d'un IQH est une carte du potentiel de l'habitat. Pour les espèces en situation précaire, les IQH permettent, par exemple, d'orienter les priorités de conservation d'habitat en ciblant les bons secteurs, d'évaluer les risques liés à des projets de développement et d'orienter les inventaires vers les habitats propices. Pour les espèces indicatrices de la qualité du milieu, ils permettent notamment de dresser des portraits de territoires en vue de prendre des décisions de gestion et de conservation, de prévoir des situations futures ou de comparer différents scénarios d'aménagement. Voir la comparaison entre les différents types de modèles pour plus de détails (MELCCFP et CERFO, 2025).

2. Notions d'écologie

2.1 Description

La salamandre à quatre orteils est un urodèle appartenant à la famille des Pléthodontidés, qui sont dépourvus de poumons (figure 1). Elle est l'unique représentante de son genre dans le monde (Desroches et coll., 2005). Il est essentiel que la salamandre à quatre orteils puisse maintenir un contact constant avec le sol humide ou la litière humidifiée parce qu'elle doit conserver sa peau humide pour être en mesure de respirer (Welsh et Droege, 2001).



© MELCCFP.

Figure 1. Salamandre à quatre orteils (*Hemidactylium scutatum*)

Il s'agit de la seule représentante de cette famille qui utilise les étangs pour se reproduire. Son comportement cryptique et son habitat hyperspécialisé font en sorte qu'elle est rarement observée (Saugey et Trauth, 1991; Bonin, 1999; Desroches et coll., 2005). Au Canada, sa situation est jugée non préoccupante (G5), alors qu'au Québec, l'espèce est susceptible d'être désignée menacée ou vulnérable et s'est vu attribuer un statut de précarité de S3 (à risques modérés d'extinction ou d'extirpation) (Gouvernement du Québec, 2025b).

2.2 Répartition

Au Canada, on trouve cette salamandre en Ontario, au Québec, au Nouveau-Brunswick et en Nouvelle-Écosse. Les mentions les plus nordiques au Nouveau-Brunswick et en Nouvelle-Écosse ont été faites à des latitudes semblables à celle de la ville de Québec. En Ontario, la mention la plus nordique se trouve à environ 220 km plus au nord (Bonisteel, 1973). Cela porte à croire que la salamandre à quatre orteils pourrait se trouver à des latitudes plus hautes au Québec, surtout dans l'ouest de la province. Toutefois, elle semble plus rarement observée au-dessus de la limite de 180 jours de croissance (Pouliot et Desroches, 2005; Bonin, 1999).

Au Québec, l'aire de répartition de la salamandre à quatre orteils est étendue et fragmentée, s'étalant au sud-est jusqu'en Beauce (Desroches et Couture, 2002) et à l'est sur la rive nord du Saint-Laurent jusqu'à Québec (Pouliot et Desroches, 2005). Malgré cela, elle est considérée comme rare, parce qu'elle est associée à des microhabitats spécifiques, souvent de faible superficie, et qu'elle n'est connue qu'en peu d'endroits (Desroches et coll., 2005). Elle est également présente au nord-est des États-Unis, et des populations fragmentées sont recensées au Wisconsin, du Minnesota jusqu'en Louisiane, au Mississippi et au nord-ouest de la Floride (Petranka, 1998). Cette répartition discontinue serait associée à ses microhabitats spécialisés (Chalmers, 2004; Chalmers et Loftin, 2006) composés de forêts humides colonisées par des sphaignes et qui ont souvent fait l'objet de modifications anthropiques (Scheffers et coll., 2012).

2.3 Habitat

À l'instar de plusieurs amphibiens, la salamandre à quatre orteils occupe principalement la litière humide des habitats terrestres (Trenham et Shaffer, 2005), mais elle a besoin d'un environnement aquatique pour son développement larvaire (Bonin, 1999). Normalement, elle dépose ses œufs sur des monticules colonisés par des mousses à sphaignes adjacents à un milieu humide (Bishop, 1941; Breitenbach, 1982 dans Bonin, 1999; Pouliot et Desroches, 2005).

2.3.1 Habitat terrestre

L'habitat terrestre de la salamandre à quatre orteils est caractérisé par la présence d'une épaisse litière et de débris ligneux qui offrent un habitat optimal pour les juvéniles et les adultes en dehors de la saison de reproduction (Bonin, 1999). La canopée du couvert forestier doit être relativement fermée et la présence de strates arbustives est importante pour retenir l'humidité de la litière et du sol forestier. Un couvert forestier fermé est également nécessaire pour stimuler la croissance d'un couvert de mousse au pourtour des nappes d'eau (Herrmann et coll., 2005; Harris, 2005). La salamandre à quatre orteils vit principalement dans la litière humide pour s'y nourrir et s'y accoupler. L'humidité relative de cet habitat doit donc être élevée (Welsh et Droege, 2001).

L'espèce privilégie les peuplements feuillus et mixtes quoique certains individus ont été repérés dans des peuplements résineux (Neill, 1963). Généralement, la salamandre à quatre orteils est associée aux forêts feuillues et mixtes à proximité de petits milieux humides de type ombrotrophe (*bog* : alimentés uniquement par les précipitations atmosphériques) et minérotrophe (*fen* : alimentés par les précipitations atmosphériques et l'eau souterraine) ou de type tourbière boisée colonisée par des sphaignes (Bonin, 1999).

Par ailleurs, Pouliot et Desroches (2005) ont découvert l'espèce dans un boisé urbain de Québec. Bastien et Pouliot (2008) ont également décrit le couvert forestier autour du site. L'habitat terrestre était une forêt mixte à dominance feuillue regroupant l'érable à sucre (*Acer saccharum*), le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia*), le chêne rouge (*Quercus rubra*), l'érable de Pennsylvanie (*Acer pennsylvanicum*), le bouleau blanc (*Betula papyrifera*), le bouleau gris (*Betula populifolia*), le sapin baumier (*Abies balsamea*) et la pruche du Canada (*Tsuga canadensis*).

2.3.2 Habitat de ponte

L'accouplement se produit à l'automne (Bishop, 1941), mais les femelles conservent les spermatophores dans leur spermathèque jusqu'au printemps suivant.

À l'échelle des microhabitats, la femelle semble préférer un monticule ou des rives aux pentes abruptes colonisés par des mousses à sphaignes pour y pondre (Bonin, 1999; Pouliot et Desroches, 2005). Dans ce contexte, il faudrait considérer les milieux humides de types tourbières *bog* et *fen* et les marécages à sphaignes comme habitats potentiels.

Ses habitats de ponte sont donc composés de forêts mésiques abritant des eaux lenticules et sans poissons telles que les étangs temporaires dont les rives présentent des mousses à sphaignes sur des monticules ou boutons, ou parfois sur du bois mort surplombant l'eau (Petranka, 1998 dans Herman et Bouzat, 2016; Desroches et coll., 2005; Harris, 2005, Pouliot et Desroches, 2005; Wahl et coll., 2008; Vitale, 2013). Desroches et coll. (2005) ont aussi trouvé des œufs gardés par des femelles dans des boutons de sphaignes croissant à la base d'aulnes rugueux (*Alnus rugosa*). Les œufs sont

déposés sur la mousse à quelques centimètres de l'eau (Bishop, 1941 ; Desroches et coll., 2005). La femelle garde ainsi les œufs jusqu'à l'éclosion et plus d'une femelle peut pondre sur le même nid. À la suite de l'éclosion, le stade larvaire ne dure que six semaines et les juvéniles quittent alors le milieu aquatique vers l'habitat terrestre. Au Québec, les déplacements observés entre les sites de ponte et l'habitat terrestre peuvent atteindre 72 m (Pouliot et Desroches., 2005; Bastien et Pouliot, 2008).

En raison de cette faible mobilité, on peut s'attendre à ce que l'habitat préférentiel soit constitué de l'écotone entre les peuplements mélangés préférentiellement matures de l'habitat terrestre et les peuplements de la forêt humide. Cet écotone serait constitué d'une bande d'environ 120-150 m (Bastien et Pouliot, 2008).

3. Méthodologie

3.1 Aire d'étude

Tout d'abord, l'aire de répartition connue de la salamandre à quatre orteils couvre une bonne partie du sud du Québec (Desroches et Rodrigue, 2018). Cependant, son aire de répartition se limite aux zones de plus de 180 jours de croissance par année (Pouliot et Desroches, 2005; Bonin, 1999). Les cartes écoforestières comprennent des données provenant de variables bioclimatiques estimées à l'aide du logiciel BioSIM du Service canadien des forêts (Gouvernement du Canada, 2020). Le nombre de jours de croissance permet d'établir les limites de l'aire de répartition de l'espèce au Québec. La figure 2 présente l'aire de répartition des polygones écoforestiers dont la période de croissance a une durée supérieure ou égale à 180 jours. Les analyses présentées dans la prochaine section ont été appliquées uniquement dans cette répartition, qui constitue une limite géographique.

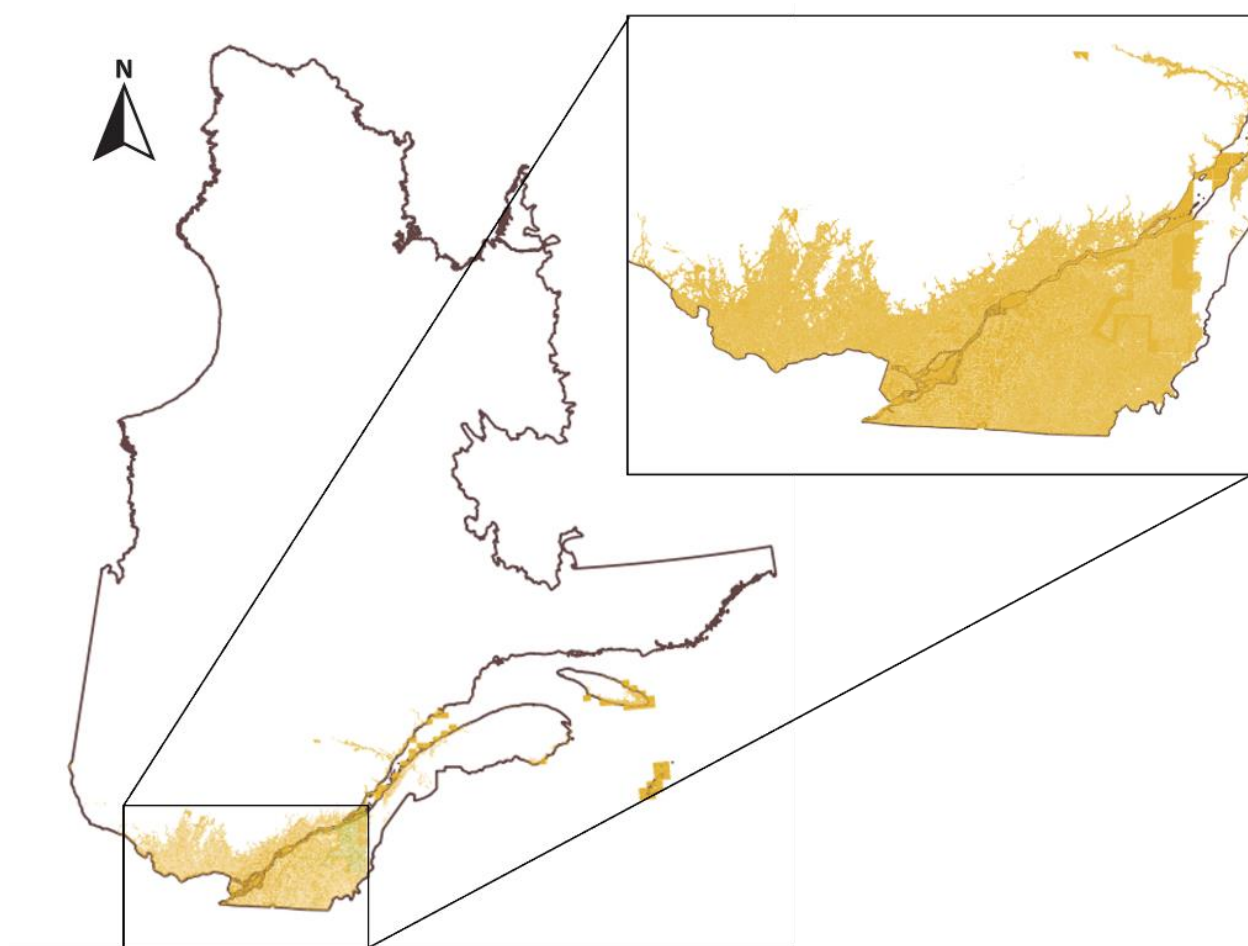


Figure 2. Représentation de l'aire de répartition (en jaune) des polygones écoforestiers dont la période de croissance a une durée de plus de 180 jours pour l'ensemble du territoire du Québec

3.2 Exploration et regroupement des données

3.2.1 Approche

Les salamandres à quatre orteils vivent dans des microhabitats et plusieurs variables importantes, telles que l'hydropériode, les débris ligneux ou la présence de cavités dans le sol, sont difficiles à intégrer dans

un modèle utilisant un système d'information géographique (SIG). Puisque le domaine vital de l'espèce semble de faible superficie (déplacements faibles), la recherche d'habitats propices devrait être orientée sur une mince bande de l'écotone entre la forêt mixte et la forêt humide.

Peu de documentation concernant les habitats de la salamandre à quatre orteils est disponible dans la littérature scientifique. L'approche suggérée ci-après est basée sur ce qui est généralement reconnu comme constituant les variables d'habitats les plus probantes pour tester les modèles à concevoir. Il s'agit d'identifier les bandes d'environ 150 m constituant les écotones mésiques entre les forêts mixtes matures à dominance feuillue et les forêts humides susceptibles de supporter la croissance de sphaignes.

3.2.2 Variables retenues

L'approche utilisée pour concevoir le présent IQH repose sur les caractéristiques permettant d'identifier les zones de reproduction, et de s'assurer que l'habitat soit également favorable autour de ces zones de reproduction. À la suite d'une revue de littérature (Fink et coll., 2021), différentes variables ont été identifiées pour décrire certaines caractéristiques de l'habitat potentiel de l'espèce, soit :

- les jours de croissance;
- le type de couvert forestier et sa composition en essences;
- la présence de cuvettes/humidité du sol : indice d'humidité topographique (*Topographic Wetness Index* – TWI);
- l'humidité du sol : *Normalized Difference Water Index* (NDWI);
- la proximité de milieux humides et aquatiques : milieux humides et cours d'eau.

À ces variables s'ajoutent les points d'observation de la salamandre à quatre orteils tirés de la base de données BORAQ du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP, 2023; ci-après le Ministère), qui ont également été pris en compte.

Une fois les données sélectionnées, celles-ci ont été groupées en classes d'importance puis combinées pour identifier les zones de reproduction. Pour faciliter les manipulations et limiter l'espace de stockage, les variables ont été converties au format matriciel (*raster*), chaque variable correspondant donc à un fichier distinct. Ces derniers ont une résolution spatiale de 10 m x 10 m pour représenter adéquatement les sites potentiels et limiter la complexité liée à des données à plus fine échelle.

Par la suite, une analyse de voisinage (filtre géomatique avec une fenêtre mobile de 9 x 9 cellules appliqué à chacune des cellules de l'IQH final au format matriciel [*raster*]) a permis de prendre en compte la qualité de l'habitat en périphérie des sites de reproduction. Finalement, l'analyse de voisinage a été combinée au potentiel de site de reproduction pour être ensuite normalisée. Puis, une analyse statistique a permis d'établir la probabilité d'occurrence de la salamandre.

3.2.3 Données utilisées

La première variable utilisée a été le nombre de jours de croissance pour bien définir la limite géographique de la distribution potentielle de l'espèce et pour circonscrire les analyses. La salamandre à quatre orteils requiert également la présence de cuvettes ou de zones d'accumulation d'eau pour son développement larvaire (figure 3). La création d'une zone tampon de 200 m autour des milieux humides permet d'intégrer cette variable, nécessaire à différents stades de vie (Fink et coll., 2021). Pour ce faire, une zone tampon a été ajoutée aux milieux humides du sud du Québec, cartographiés en 2020 par Canards Illimités Canada (CIC, 2018). Les milieux humides contenus dans la cartographie des milieux humides potentiels du Québec (CMHPQ), diffusée par la Direction de la connaissance écologique (DCE) du Ministère (MELCCFP, 2025), ont également été utilisés. Finalement, une zone tampon de 50 m a été appliquée sur les cours d'eau linéaires de la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ; MRNF, 2019). Ces trois sources de données ont été combinées pour former un unique fichier matriciel binaire. Les pixels ayant une valeur de 1 correspondent aux polygones des zones tampons et les valeurs de 0 correspondent aux zones exclues de l'analyse.



© ELISO.

Figure 3. Habitat typique de la salamandre à quatre orteils

En plus des milieux humides, l'indice d'humidité topographique (TWI; MRNF, 2020) a été calculé à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) à 10 m de résolution spatiale généré à partir de données radar (SRTM) par la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Le TWI permet de quantifier le contrôle de la topographie sur les processus hydrologiques. Il prend en compte la pente et l'aire de contribution, c'est-à-dire la surface du terrain situé en amont qui contribue à l'écoulement de l'eau vers un point donné. Il est déterminé par la pente et la zone de contribution en amont. Dans le cadre d'un projet réalisé par le Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO) sur la cartographie des étangs vernaux (Varin et coll., 2021), des plages de valeurs de TWI ont été identifiées pour détecter les milieux humides. Ainsi, les valeurs de TWI inférieures à 6 représentent les endroits secs, et les valeurs supérieures à 6 et inférieures à 16 correspondent à des milieux humides. Finalement, les valeurs supérieures à 16 correspondent à des milieux hydriques. Le TWI a été préféré à la classe de drainage des polygones écoforestiers, car il présente une échelle plus fine de 10 m x 10 m, alors que la valeur de classe de drainage est attribuée à l'ensemble du polygone écoforestier (4 ha = 200 m x 200 m). Il est donc difficile d'identifier des sites humides à l'intérieur des grands polygones écoforestiers.

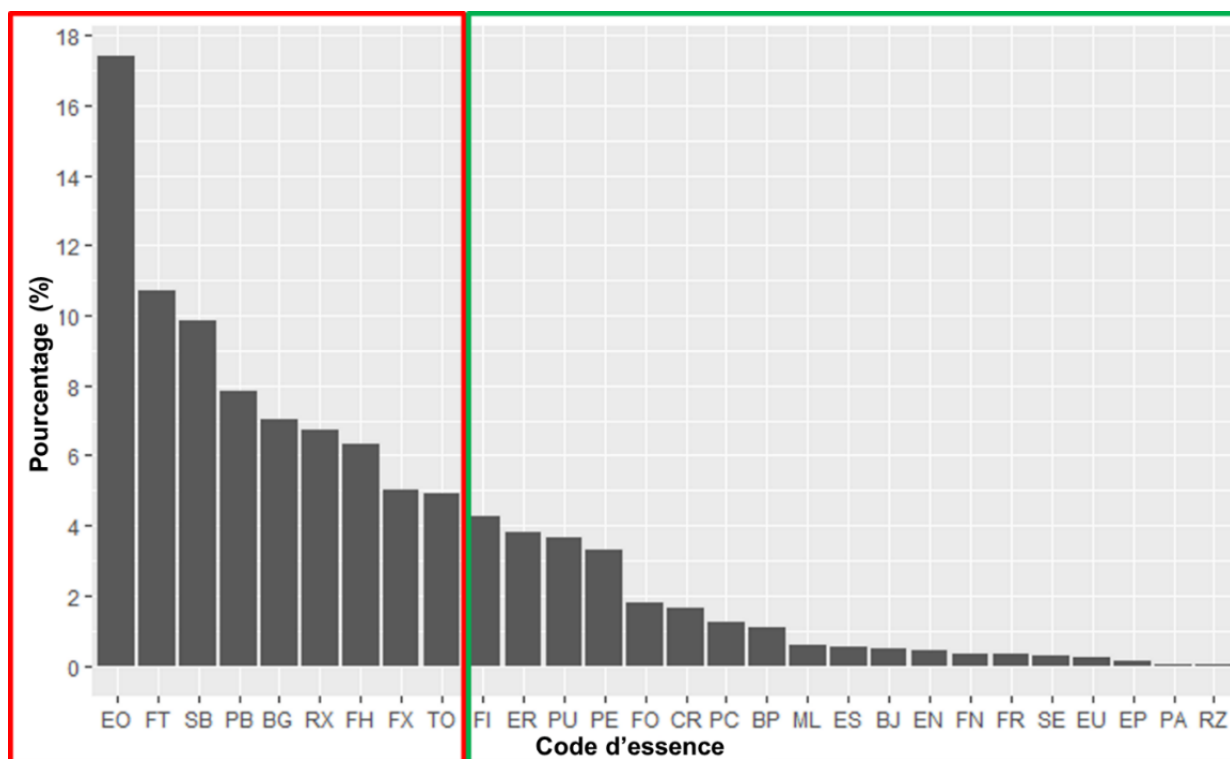
En ce qui a trait à la végétation, plusieurs possibilités d'essences se trouvent dans l'habitat de la salamandre à quatre orteils. Les polygones écoforestiers contiennent cette information (MRNF, 2017). Vu la grande quantité de groupes d'essences potentiels, ceux-ci ont été regroupés en classes pour faciliter leur utilisation et leur interprétation, mais également la pondération de l'IQH. Bien que certains polygones forestiers ne contiennent aucun groupe d'essences, ils peuvent fournir une information pertinente sur le code de terrain tel que décrit dans la norme de stratification écoforestière (Berger et coll., 2015). Ce code de terrain (CO_TER) comprend les aulnaies, les lignes de transport d'énergie, les terrains dénudés humides ou encore les zones moins propices comme les sites agricoles. Tout comme les groupes d'essences, les valeurs du code de terrain ont été regroupées en classes pour faciliter leur intégration dans l'IQH.

3.2.4 Création des classes

En plus des différentes données mentionnées ci-haut, des données d'observations de salamandre étaient également disponibles (MELCCFP, 2023). Celles-ci ont permis d'évaluer si les variables

sélectionnées étaient adéquates, et quelles valeurs correspondaient davantage à la présence de salamandres à quatre orteils. Pour chaque observation, les valeurs associées à chacune des variables ont été extraites.

La variable qui présente la plus grande quantité de valeurs possibles est le groupe d'essences forestières. Cet attribut issu des polygones écoforestiers peut comprendre entre zéro et trois paires de lettres représentant les codes d'essences qui composent le peuplement forestier. Sur les 946 observations de salamandre à quatre orteils disponibles dans la base de données BORAQ, 780 avaient au moins un code d'essence (deux lettres). Les 166 autres étaient également dans un polygone écoforestier sans code d'essence, mais présentaient une valeur de code de terrain. Pour les groupes d'essences, la figure 4 présente le pourcentage d'individus observés dans les différents codes d'essences. Plus de 50 % des observations sont représentées par seulement neuf codes d'essences. De plus, 132 des 780 observations avaient le code d'essence EO (érable rouge) dans son groupe d'essences.



Note : Les définitions des codes d'essences forestières se trouvent au tableau 1.

Figure 4. Pourcentage des observations comportant les différents codes d'essences dans l'attribut « groupe d'essences » (GR_ESS) des polygones écoforestiers. Les codes d'essences de la classe 1 sont encadrés en rouge et ceux de la classe 2, en vert. Le code FO, bien qu'affiché dans l'encadré vert, fait partie de la classe 1.

Comme il a été mentionné plus haut, 166 observations n'avaient pas de valeur de groupe d'essences, mais présentaient, en revanche, une valeur de code de terrain. Le fait de ne pas avoir de groupe d'essences ne signifie pas nécessairement que le potentiel de présence est nul. Les codes d'essences ont donc été regroupés en quatre classes. La classe 1 comprend les neuf codes présents dans l'encadré rouge de la figure 4, et la classe 2 contient les codes d'essences de l'encadré vert (figure 4). La classe 3 correspond aux polygones qui n'ont pas de valeur de groupe d'essences. Finalement, la classe 4 regroupe tous les autres codes d'essences qui ne sont pas représentés dans la figure 4. Les différentes classes sont détaillées dans le tableau 1. Il est important de noter que le code FO (frênes noirs) a été ajouté à la classe 1, même s'il ne faisait pas partie de l'encadré rouge (figure 4). Cet ajout survient à la suite d'échanges avec différents experts du milieu qui ont identifié ce code d'essence comme ayant un potentiel élevé (Yohann Dubois, biologiste, MELCCFP, communication personnelle, décembre 2021).

Tableau 1. Composition et signification des quatre classes définies pour la variable du groupe d'essences et des valeurs de codes d'essences possibles

Classe	Code d'essence	Définition	Code d'essence	Définition
1	EO	Érable rouge	RX	Résineux indéterminé
	FT	Feuillus tolérants	FH	Feuillus en station humide
	SB	Sapin baumier	FX	Feuillus indéterminés
	PB	Pin blanc	TO	Thuya occidental
	BG	Bouleau gris	FO	Frênes noirs
2	FI	Feuillus intolérants à l'ombre	BJ	Bouleau jaune
	ER	Érable	EN	Épinette noire
	PU	Pruche du Canada	FN	Feuillus non commerciaux
	PE	Peupliers naturels	FR	Frênes
	CR	Chêne rouge	SE	Sapin baumier et épinette blanche
	PC	Pin rigide	EU	Épinette rouge
	BP	Bouleau à papier	EP	Épinettes noire et rouge
	ML	Mélèze laricin	PA	Peuplier baumier
	ES	Érable à sucre	RZ	Résineux reboisés indéterminés
3	NA	Aucune valeur attribuée		
4	Tous les autres codes d'essences			

Les codes de terrain ont 11 appellations différentes (tableau 2). Parmi les codes possibles, quatre regroupent un plus grand nombre d'observations. Les codes DH et AL sont les deux plus fréquents, suivis par LTE et INO. Finalement, les codes de terrain ont été regroupés en trois classes. La classe 1 comprend les codes AL et DH, et la classe 2 regroupe les codes LTE et INO. La classe 3 contient les polygones qui n'ont pas de valeur de code de terrain (NA). Finalement, les autres codes possibles n'ont pas été retenus (classe 0), car ils présentaient un nombre plus faible d'observations.

La dernière variable évaluée a été le TWI. Pour ce faire, une zone tampon de 50 m de rayon autour de chacune des observations a servi à extraire les valeurs minimales, maximales et moyennes du TWI. Ces valeurs permettent d'évaluer la variation du TWI autour des observations. La figure 5 contient les distributions des valeurs de TWI maximales, minimales et moyennes obtenues dans cette zone tampon. On constate que les valeurs de TWI sont presque entièrement supérieures à 10. Comme il a été mentionné antérieurement, les valeurs supérieures à 6 et inférieures à 16 représentent généralement les milieux humides. De plus, malgré une résolution grossière de 10 m, les valeurs minimales et maximales sont relativement près les unes des autres. Cela signifie que les valeurs de TWI sont similaires dans la zone tampon et qu'il est possible d'identifier de petites superficies humides. Pour s'assurer de conserver uniquement les valeurs de TWI susceptibles de contenir des habitats favorables, seules les valeurs de TWI supérieures ou égales à 10 ont été retenues.

Tableau 2. Codes de terrain des 166 points d'observation qui ne comportent pas de valeur de groupe d'essences

Classe	Code de terrain	Définition	Nombre de points d'observation
1	AL	Aulnaie	19
	DH	Dénudé humide	84
2	INO	Site inondé, site exondé non régénéré	6
	LTE	Ligne de transport d'énergie	16
3	NA	Aucun code attribué	27
0	A	Terrain agricole	3
	ANT	Milieu fortement perturbé par l'activité humaine (non boisé)	4
	DS	Dénudé sec	3
	EAU	Étendue d'eau	1
	RO	Route et autoroute (emprise)	3

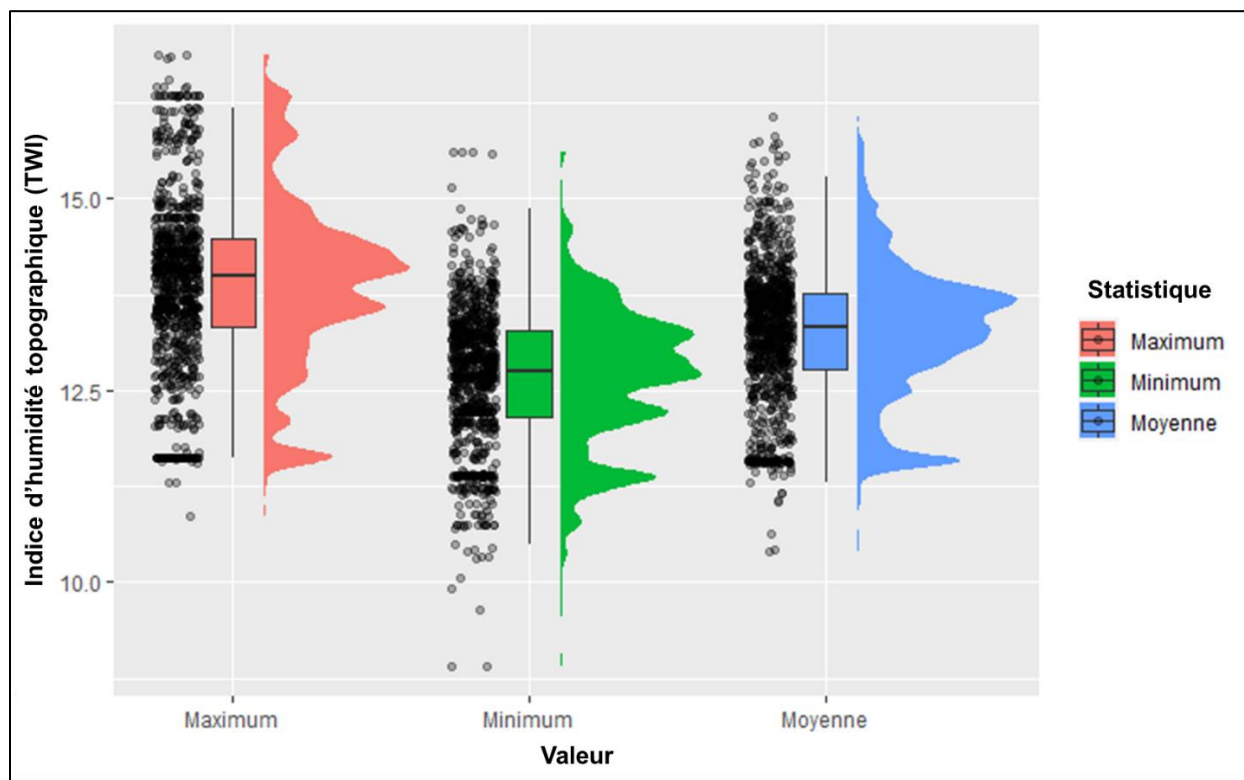


Figure 5. Distribution des valeurs de l'indice d'humidité topographique (TWI) maximales, minimales et moyennes dans un rayon de 50 m autour des observations de salamandre à quatre orteils

Finalement, la couverture disponible des données climatiques servant à extraire la zone de 180 jours de croissance n'était pas continue sur l'ensemble du territoire. La figure 6 localise la zone où les données sur la durée de la période de croissance étaient absentes. Pour cette zone, on a tenu pour acquis que la période de croissance était de 180 jours et plus pour l'ensemble des polygones écoforestiers. Ceux-ci ont été intégrés dans le calcul de l'IQH.

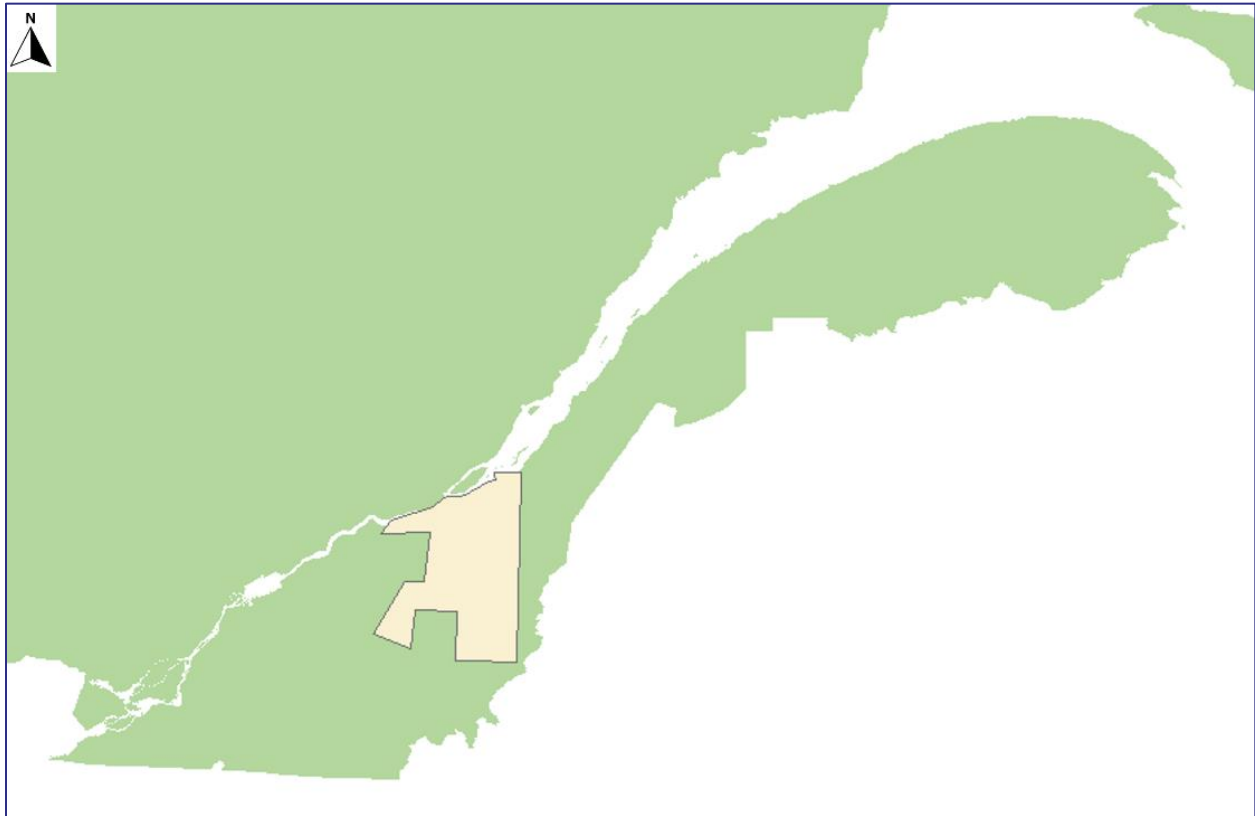


Figure 6. Zone où le nombre de jours de la période de croissance n'était pas connu (en jaune)

3.3 Calcul de l'indice de qualité de l'habitat (IQH)

Pour calculer l'IQH, les données ont été converties en fichiers matriciels. Le groupe d'essences prend alors une valeur entre 1 et 4, où 1 réfère à la classe comportant le plus d'observations d'individus (tableau 1). Le code de terrain prend les valeurs 0, 1, 2 ou 3, où 1 réfère à la classe comportant le plus d'observations, et 0 aux codes non retenus en raison du faible nombre d'observations (tableau 2). Par la suite, les milieux humides et les cours d'eau (valeur de 0 = absence et 1 = présence) ont été intégrés. Finalement, les valeurs de TWI supérieures à 10 ont été ajoutées afin d'intégrer les secteurs humides. Ainsi, plus la valeur de TWI est élevée, plus le secteur est humide (figure 5).

La première étape consistait à calculer un IQH local.

Équation 1
$$IQH_{local} = \frac{(Classe\ GR_ESS + Classe\ Code\ Terrain) \times Milieux\ Humides}{Valeur\ de\ TWI}$$

Comme il a été mentionné plus haut, une salamandre peut se trouver à une distance de 50 m de son site de reproduction. Pour considérer cette possibilité, une analyse de voisinage a été réalisée à l'aide d'une fenêtre mobile. Cette fenêtre comprend 9 x 9 cellules, soit 40 m de part et d'autre du pixel analysé, donc un rayon d'environ 50 m. Elle passe ensuite sur chaque pixel de l'IQH local puis calcule la moyenne des valeurs trouvées autour du pixel central. Avec cette approche, il est possible d'évaluer si les habitats en périphérie d'un pixel dont l'IQH local est élevé (site de reproduction potentiel) présentent également des valeurs élevées. Une fois l'analyse de voisinage effectuée, les deux couches sont additionnées : $IQH_{local} + IQH_{voisinage} = IQH_i$. Par la suite, les valeurs sont normalisées selon le minimum et le maximum.

Équation 2
$$IQH \text{ normalisé (final)} = 1 - \left(\frac{IQH_i - \text{Minimum } IQH}{\text{Maximum } IQH - \text{Minimum } IQH} \right)$$

Cette normalisation permet de répartir les valeurs de l'IQH entre 0 et 1. Pour finir, il est possible de calculer une probabilité de présence. Il s'agit de l'intervalle de valeurs de l'IQH dans lequel le potentiel de trouver des salamandres à quatre orteils est le plus élevé. Tout comme dans Varin et coll. (2021), les valeurs de l'IQH normalisé ont été transformées à l'aide de l'équation suivante :

Équation 3
$$\text{Probabilité de présence} = \frac{1}{(1 + e^{-IQH \text{ normalisé (final)}})}$$

4. Résultats

La cartographie issue de l'IQH sur l'ensemble du territoire québécois est reproduite à la figure 7. Les valeurs de probabilité de présence varient entre 0 (faible) et 1 (élevée).

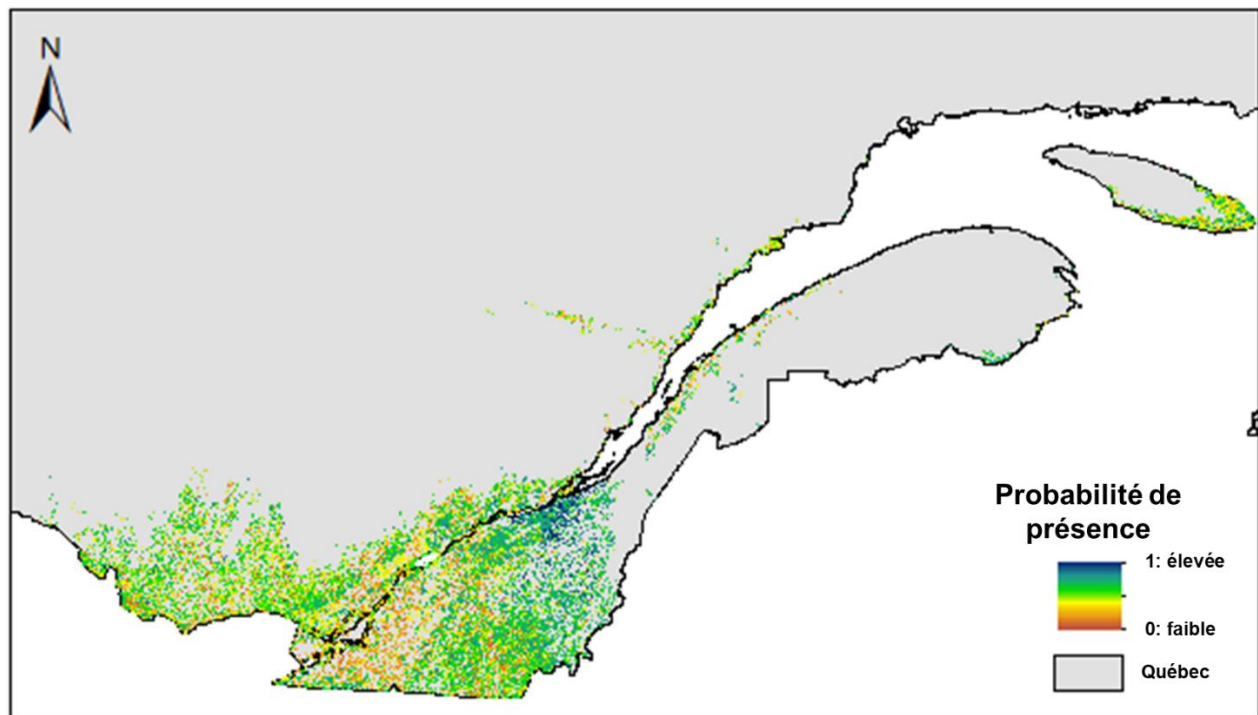


Figure 7. Probabilité de présence de la salamandre à quatre orteils sur l'aire d'étude

Il est possible d'évaluer les valeurs obtenues à partir de l'IQH en fonction des données d'observation. Pour ce faire, une zone tampon de 1 m autour de chaque observation sert à extraire les valeurs minimales de l'IQH (figure 8). Sur l'ensemble des observations, plus de la moitié présentent des valeurs d'IQH supérieures à 0,50. Comme il a été mentionné plus haut, certaines observations ne comportent aucune valeur de groupe d'essences ni de code de terrain. Les deux variables restantes, le TWI et la limite géographique des milieux humides, permettent d'évaluer le potentiel d'habitat. Lorsque seules ces deux variables sont disponibles, l'IQH prend une valeur plus faible. Au contraire, les observations ayant des valeurs de groupe d'essences ou de code de terrain de 1 et 2 prennent des valeurs plus élevées.

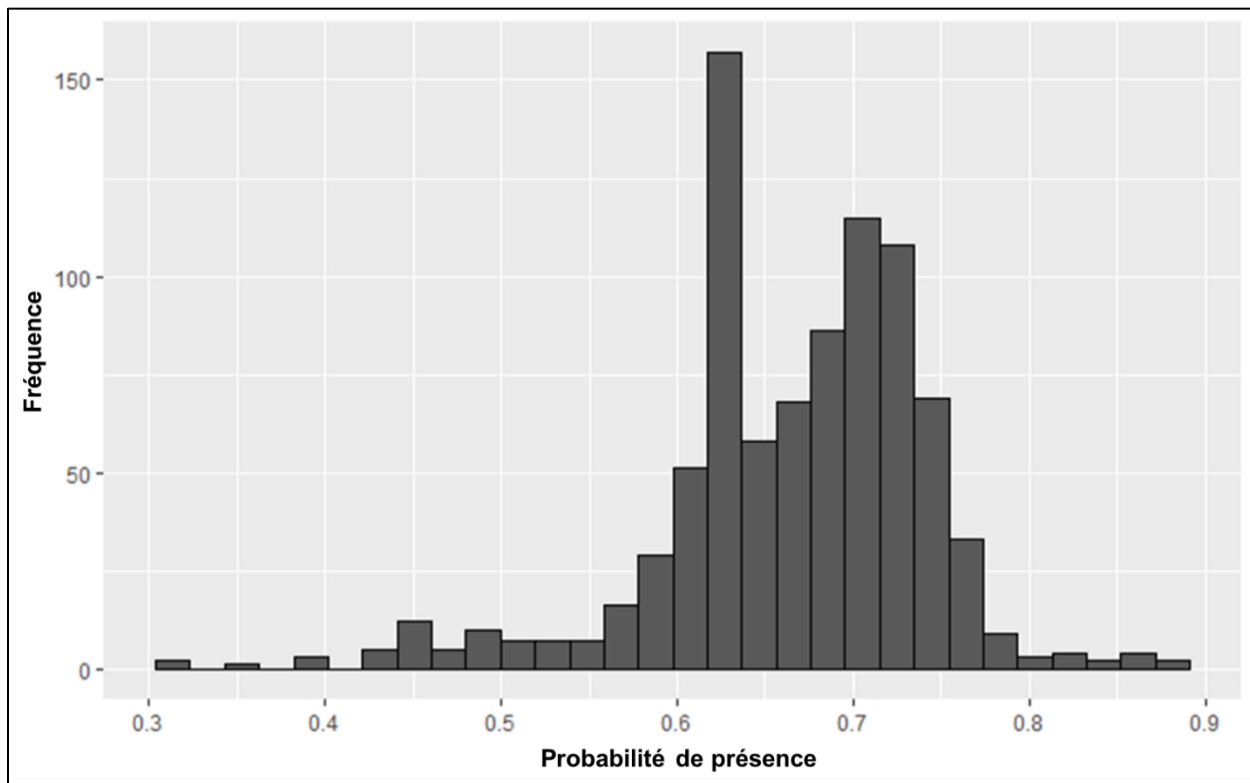


Figure 8. Valeurs de l'indice de qualité de l'habitat (IQH) pour les observations de salamandre à quatre orteils au Québec

Les variations dans les valeurs de l'IQH sont principalement attribuables au TWI. Puisqu'il apporte une information additionnelle sur les processus hydrologiques en fonction de la topographie, cet attribut apporte la variabilité au sein du polygone écoforestier, contrairement aux valeurs de groupe d'essences et de code de terrain, qui sont fixées pour toute l'étendue du polygone. La figure 9 contient les valeurs de l'IQH trouvées dans un polygone écoforestier où deux salamandres à quatre orteils ont été observées. Tout d'abord, les valeurs de l'IQH sont beaucoup plus élevées près de l'observation au sud, alors que le potentiel diminue dans la section nord du polygone. Cela pourrait s'expliquer par la limite nord du polygone, qui se trouve près de la limite tampon de 200 m autour d'un milieu humide, alors que l'observation au sud se trouve au centre du polygone. Par ailleurs, les valeurs de TWI reflètent cette différence de positionnement au sein de la zone tampon.

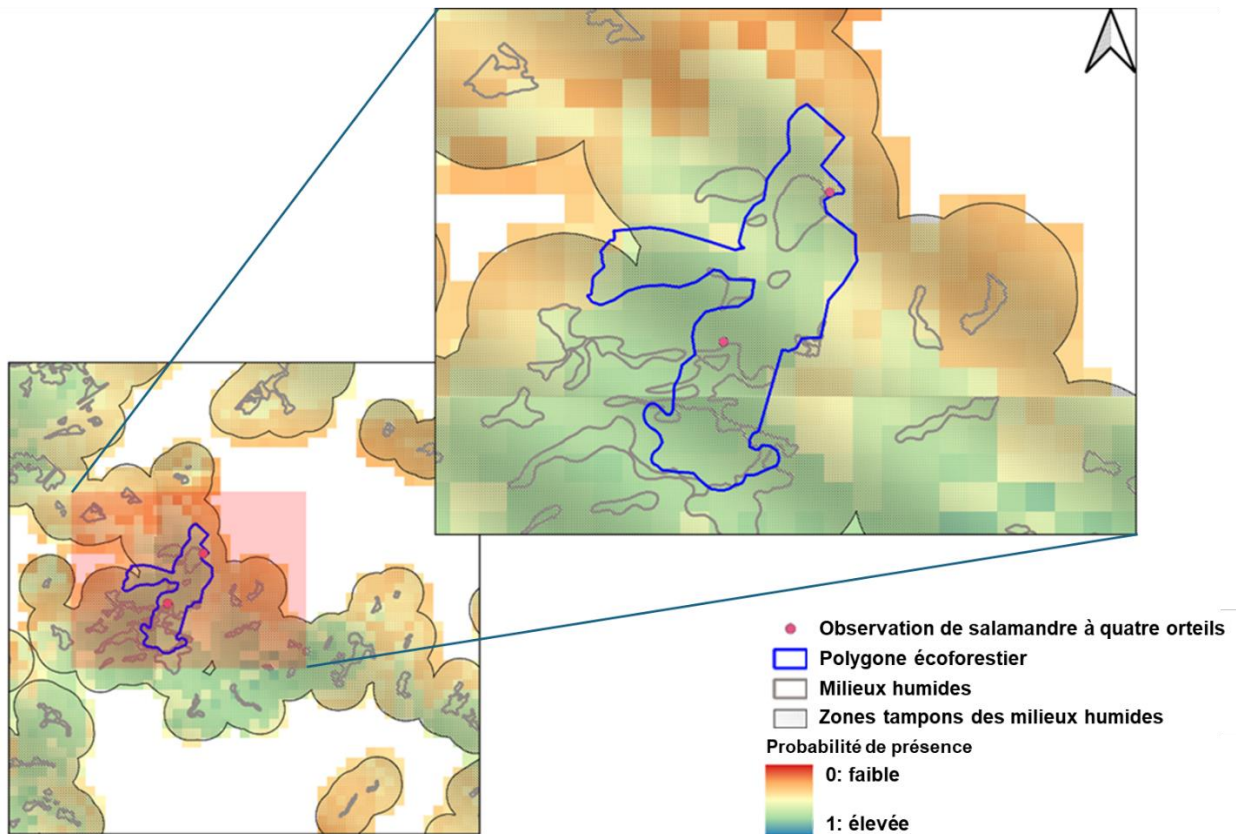


Figure 9. Représentation des valeurs de l'indice de qualité de l'habitat (IQH) dans un polygone écoforestier contenant deux observations de salamandre à quatre orteils

Le tableau 3 contient les valeurs des différentes variables trouvées sous les points d'observations de salamandre à quatre orteils. Il est important de mentionner que les valeurs de l'IQH local et de l'IQH voisinage ne sont pas normalisées, contrairement à l'IQH normalisé (final). La variation subtile du TWI se reflète dans une différence assez notable de l'IQH entre les deux observations. Il est aussi possible d'observer l'effet du voisinage sur la valeur de l'IQH. Pour l'observation nord, la valeur de l'IQH local est dans les plus basses présentes dans le polygone écoforestier. La moyenne des valeurs de l'IQH local (moyenne fournie par l'IQH voisinage) de la fenêtre de 9 x 9 cellules comprend à la fois des valeurs plus basses trouvées à la limite de la zone tampon des milieux humides et des valeurs élevées au centre du milieu humide. Une fois la moyenne appliquée, l'IQH voisinage prend des valeurs très similaires à l'IQH local. Par opposition, l'observation au sud a une valeur élevée d'IQH local. En plus du TWI, les classes de groupes d'essences (ClassEss) ne sont pas les mêmes. Dans la figure 10, les valeurs faibles de l'IQH normalisé (final) (encadré A) suivent les limites des classes d'essences présentes à l'extérieur du polygone écoforestier. La portion nord du polygone est plus entourée de classe d'essences 3, que la partie sud. Donc, l'analyse de voisinage incorpore cet effet de proximité des classes d'essences. Cela indique qu'autour de l'observation, les valeurs de l'IQH sont plus faibles en moyenne, d'où une valeur de l'IQH voisinage inférieure à la valeur de l'IQH local.

Tableau 3. Valeurs des différentes variables utilisées dans l'indice de qualité de l'habitat (IQH) présentes sous les deux points d'observations de salamandre à quatre orteils

Observation	Classes d'essences	Codes terrain	IQH local	IQH voisinage	TWI	IQH normalisé (final)
Nord	1	3	0,30	0,58	13,31	0,50
Sud	1	3	0,29	0,66	13,59	0,69

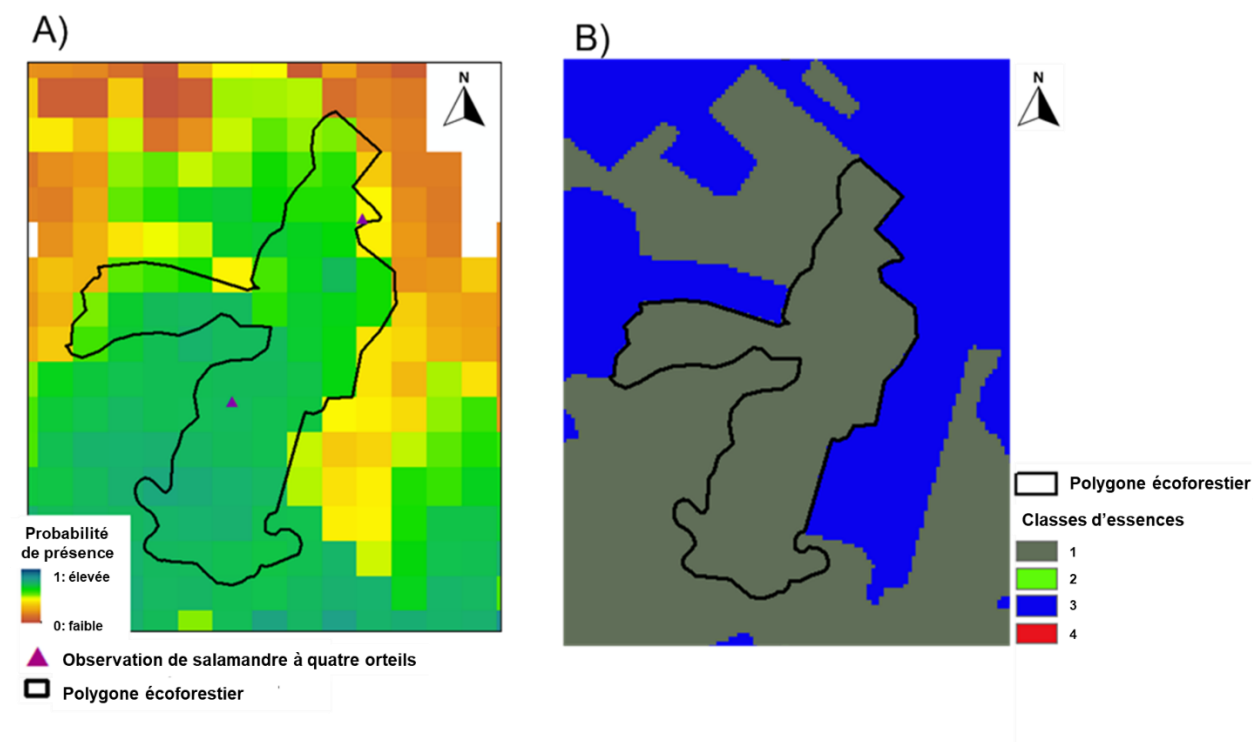


Figure 10. A) IQH normalisé (final) du polygone écoforestier où deux salamandres à quatre orteils ont été observées. B) Classes d'essences autour du polygone écoforestier.

L'équation 3 (voir la section 3.3) permet de déterminer la plage de valeurs qui représente la plus forte probabilité de présence en fonction des valeurs observées de l'IQH normalisé (final). La figure 11 présente la distribution des valeurs obtenues de probabilité de présence pour l'ensemble des observations de salamandre à quatre orteils au Québec. Avec cette figure, il est possible de définir une valeur seuil de l'IQH qui permet de conserver les zones qui présentent le plus fort potentiel de présence. On constate que la majorité des observations se trouvent sur une plage de valeurs de l'IQH supérieures à 0,60, soit 60 % de probabilité de présence. Il est donc possible de cibler ces zones et de les définir comme sites à plus fort potentiel.

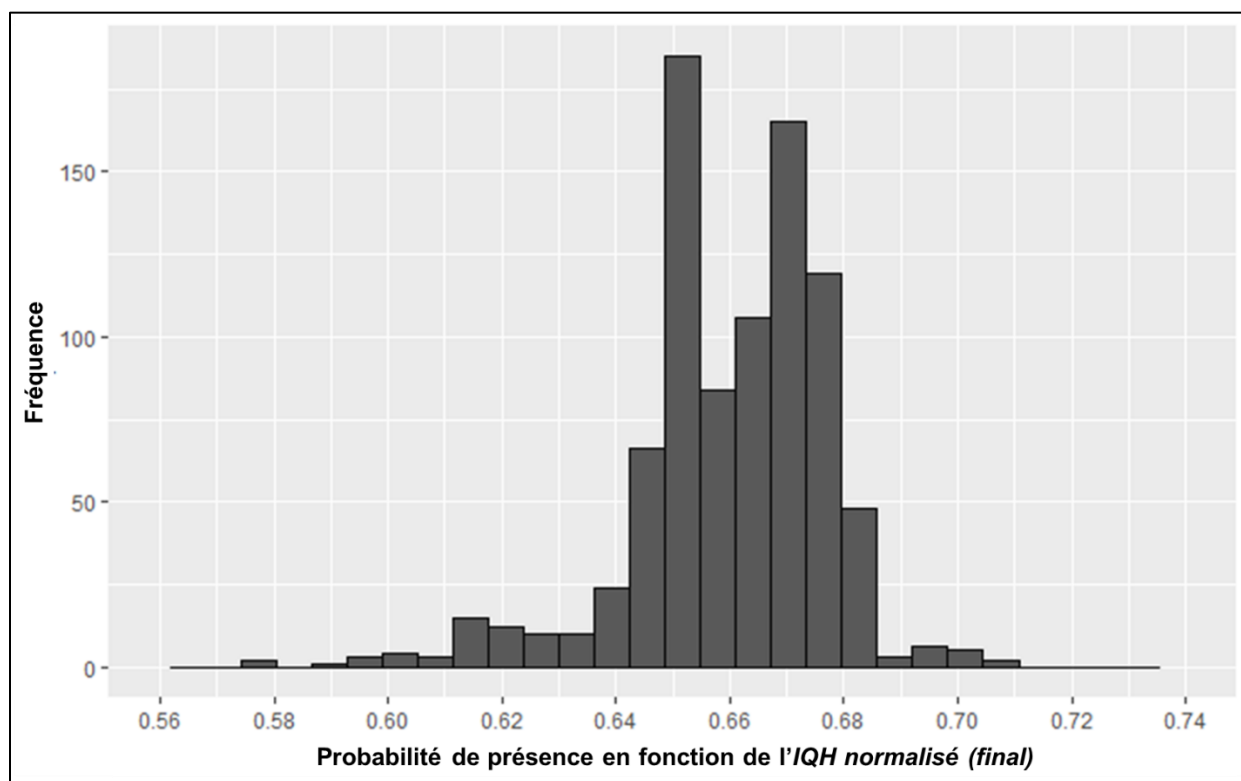


Figure 11. Probabilité de présence des salamandres à quatre orteils à la suite de la transformation de l'indice de qualité de l'habitat (IQH normalisé [final])

5. Discussion

Peu de modèles ont été conçus jusqu'à maintenant pour cibler les habitats potentiels de la salamandre à quatre orteils. Cette étude a permis d'élaborer le premier IQH pour cette espèce au Québec. En se basant sur des variables environnementales, comme le nombre de jours de croissance, le couvert forestier, l'indice d'humidité topographique, l'humidité du sol, les habitats environnants et les points d'observation de l'espèce, il a été possible de créer un outil évaluant la qualité de l'habitat pour la salamandre à quatre orteils, mais avec certaines limites. Une carte de la probabilité de présence de la salamandre à quatre orteils sur le territoire québécois a été produite. Cet outil simple classe la probabilité de présence de l'espèce selon une échelle quantitative de 0 (faible) à 1 (élevée), en fonction de la qualité de l'habitat présent.

L'IQH comporte certaines limites en comparaison avec des approches plus robustes comme les modèles de répartition d'espèce (MRE). En effet l'IQH évalue le potentiel de qualité de l'habitat, alors que le MRE évalue la présence potentielle de l'espèce à l'aide de modèles statistiques ou d'apprentissage automatique. Cependant, les MRE peuvent également présenter des limites lorsque le nombre de points d'observation est trop faible. En effet, Geschke (2019) a tenté de modéliser les caractéristiques et la connectivité des habitats de 11 espèces de salamandres, dont la salamandre à quatre orteils, dans deux comtés de la Caroline du Nord, aux États-Unis. Elle a utilisé l'outil MaxEnt (Phillips, 2017) et un modèle basé sur des règles de décision (*Rule Based Model*). Les habitats ont été classés sur une échelle de 0 à 100. Geschke (2019) disposait de huit points d'observation seulement sur le territoire pour la salamandre à quatre orteils : tous se sont avérés des faux négatifs et aucun ne s'est retrouvé dans la classe des bons habitats (80-100). En abaissant son seuil de classification à moyen, cinq des huit points d'observation sont entrés dans les habitats classés moyens (60-79).

La création de cet IQH présente certaines limites. Tout d'abord, la vaste aire de répartition de l'espèce limitait l'accès aux données lidar (*Light Detection and Ranging*) disponibles sur le territoire québécois au moment de l'analyse, mais également la résolution spatiale utilisable. Des données vectorielles auraient été plus précises, mais à cette échelle, la taille des données aurait été immense. La variable du TWI a été calculée à partir d'un MNT produit à l'aide de données radar. Certes, ce type de données est moins précis que les MNT issus des données lidar, mais la résolution spatiale est plus adaptée à la réalité de l'aire d'étude. Calculer un TWI à l'aide des MNT lidar pour l'ensemble de la zone d'étude aurait été extrêmement énergivore en temps de calcul et en volume de données, mais aurait eu le potentiel d'améliorer la précision de l'IQH.

Comme l'unité de base est un pixel de 10 m sur 10 m, les contours des éléments apparaissent plus grossiers. Cela explique en partie pourquoi on voit des lignes droites formées de pixels dans le paysage. La figure 12 montre un exemple d'une forme linéaire dans la représentation visuelle de l'IQH. Selon les classes d'essences ou les codes de terrain, les frontières entre les zones sont plus nettes. On observe aussi des formes linéaires entre les forêts et les zones agricoles, les lignes électriques, les routes et les zones bâties. Une solution pourrait être d'utiliser d'autres données géospatiales pour identifier ces éléments et les extraire avant de faire les analyses.

Ces effets linéaires sont également présents pour les valeurs élevées de l'IQH (figure 13) et généralement causés par des pixels qui couvrent en partie le côté d'un polygone linéaire de groupe d'essences. Cela donne l'impression qu'il y a un cours d'eau, mais il s'agit bien de la limite d'un polygone écoforestier.

Un autre aspect qui n'a pas été pris en compte dans l'IQH est la densité de la végétation formant le couvert forestier. La présence de trouées dans la canopée arborescente représente des sites de reproduction potentiels. Par ailleurs, la densité du couvert est également importante pour générer la litière humide nécessaire au milieu de vie de cette salamandre. Si la densité du couvert est contenue dans les variables des polygones écoforestiers, en revanche, cette classe de densité est attribuée à l'ensemble du polygone écoforestier. La figure 14 démontre qu'aucune classe de densité ne se démarque. La classe A fait référence à plus de 80 % de couvert de canopée, et la classe B, à une densité supérieure ou égale à 60 % et inférieure à 80 %. Ces deux classes sont les plus fréquentes, mais l'absence d'une classe dominante ne permet pas d'utiliser la carte écoforestière comme source de données pour la densité du couvert.

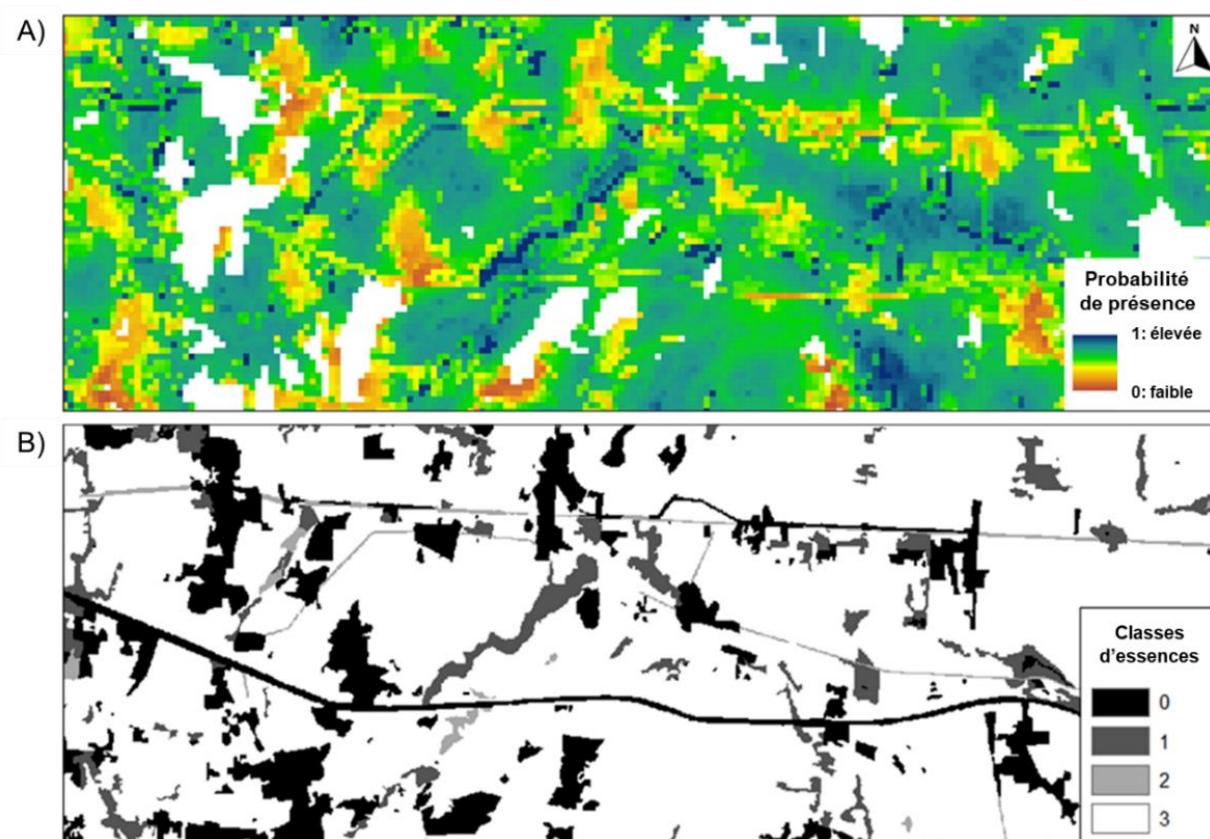


Figure 12. A) Entités linéaires trouvées dans l'indice de qualité de l'habitat (IQH normalisé [final]). B) Entités linéaires provenant des classes d'essences.

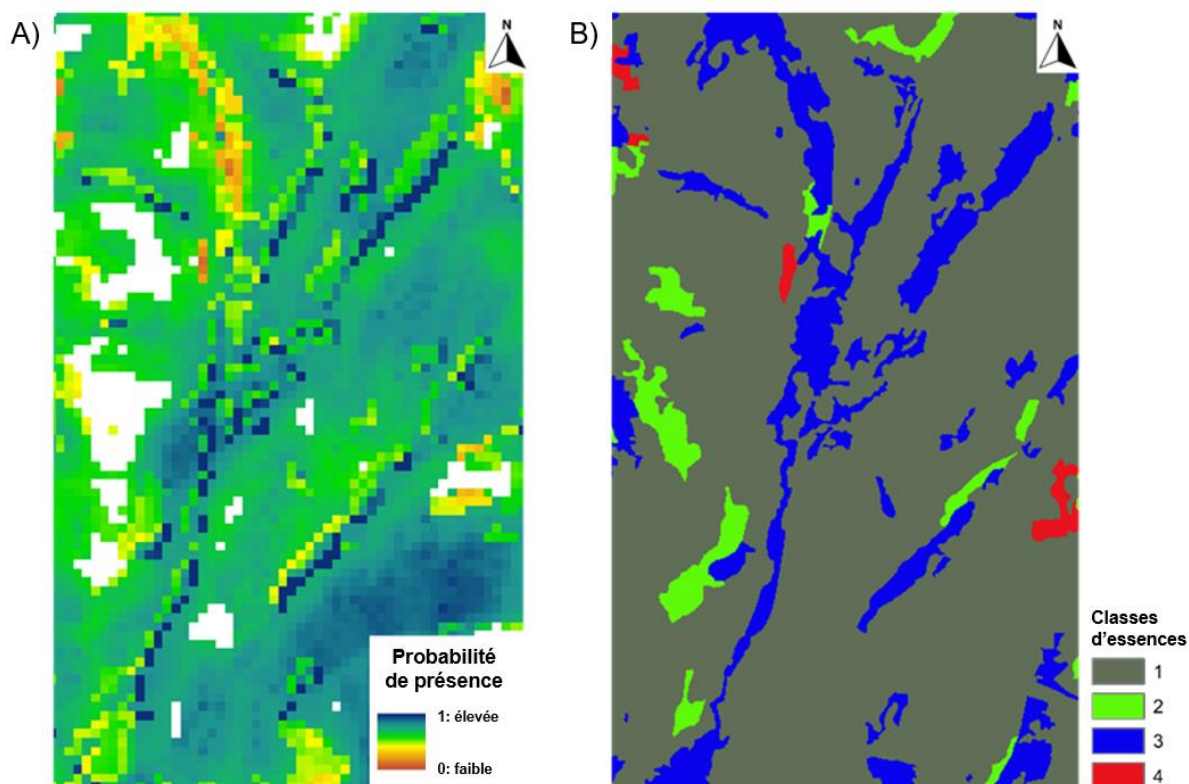


Figure 13. A) Lignes formées par des valeurs élevées de l'indice de qualité de l'habitat (IQH normalisé [final]). B) Lignes formées des polygones écoforestiers étroits.

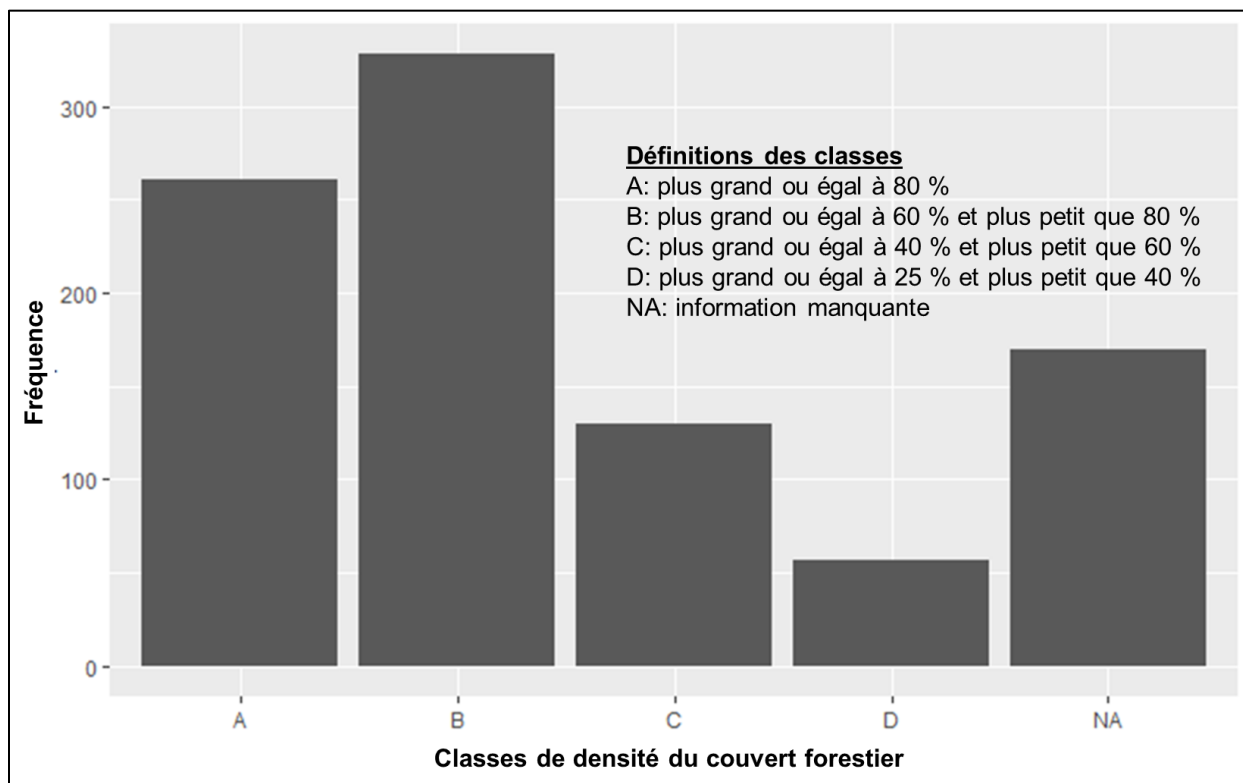


Figure 14. Distribution du nombre d'observations de salamandre à quatre orteils dans les différentes classes de densité du couvert végétal

Une source intéressante de données pour le calcul de la densité du couvert aurait été le modèle de hauteur de canopée (MHC), dérivé des données lidar. Avec le MHC, il aurait été possible de délimiter les trouées dans la canopée par segmentation ou statistique zonale et d'en dériver des statistiques sur son voisinage. Toutefois, le MHC comporte les mêmes limites que le calcul du TWI à partir du MNT lidar. Utiliser une donnée à 1 m de résolution sur l'ensemble de la zone d'intérêt serait laborieux. Même en dégradant la donnée pour la ramener à une résolution plus grossière à 5 ou 10 m, cela nécessiterait de traiter les données à plus fine résolution.

En outre, les différentes variables n'ont pas été pondérées. Puisque plusieurs observations de la salamandre à quatre orteils étaient disponibles, les groupes d'essences et les codes de terrain les plus fréquents ont servi à déterminer les différentes classes. Par ailleurs, un nombre trop élevé de groupes d'essences était possible pour qu'on puisse tous les pondérer, d'où l'intérêt de les regrouper en classes. Une méthode utilisée pour pondérer les variables est de combiner les observations avec des pseudo-absences. Cette méthode aurait permis de valider les pondérations ou le choix des classes, mais elle aurait diminué la précision de l'indice, puisqu'il aurait fallu générer des pseudo-absences.

Ce projet a permis de concevoir un IQH pour la salamandre à quatre orteils, applicable sur l'ensemble de son aire de répartition au Québec. Finalement, un ajout intéressant serait d'intégrer les données lidar dans l'IQH pour mieux cibler les zones où la densité végétale correspond le plus à l'habitat préférentiel de la salamandre à quatre orteils.

6. Références

- BASTIEN, H. et D. POULIOT (2008). *Campagne d'échantillonnage de la salamandre à quatre orteils (Hemidactylum scutatum) dans le boisé Neilson, ville de Québec*, Direction régionale de l'aménagement de la faune de la Capitale-Nationale et de la Chaudière-Appalaches, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, gouvernement du Québec, Québec. 26 p.
- BERGER, J.-P., A. LEBOEUF et I. POMERLEAU (2015). *Norme de stratification écoforestière*, quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional, Direction des inventaires forestiers, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, gouvernement du Québec, Québec, 111 p.
- BISHOP, S. C. (1941). "Salamanders of New York", *New York State Museum Bulletin*, 324: 1-365.
- BONIN, J. (1999). *COSEWIC status report on Four-toed Salamander Hemidactylum scutatum in COSEWIC assessment and status report on the Four-toed Salamander Hemidactylum scutatum in Canada*, unpublished report, Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada, Ottawa, Ontario, 21 p.
- BREITENBACH, G. L. (1982). "The frequency of communal nesting and solitary brooding in the salamander, *Hemidactylum scutatum*", *Journal of Herpetology*, 16(4): 341-346.
- CHALMERS, R. J. (2004). *Wetland and nest scale habitat use by the four-toed salamander (Hemidactylum scutatum) in Maine, and a comparison of survey methods*, Electronic Theses and Dissertations 379, master thesis, University of Maine, Maine, USA, 86 + appendix.
- CHALMERS, R. J. et C. S. LOFTIN (2006). "Wetland and microhabitat use by nesting four-toed salamanders in Maine », *Journal of Herpetology*", 40(4): 478-485.
- CIC (2018, mis à jour le 7 mai 2025). *Milieux humides cartographie détaillée*, Canards Illimités Canada [Jeu de données], dans Données Québec [En ligne] [<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/milieux-humides-du-quebec>] (Consulté le 24 novembre 2025).
- DESROCHES, J.-F. et B. COUTURE (2002). « Extension de l'aire de distribution de la salamandre à quatre doigts, *Hemidactylum scutatum*, dans l'est du Québec, et notes sur l'habitat », *The Canadian Field-Naturalist*, 116 : 317-318.
- DESROCHES, J.-F. et D. POULIOT (2005). « La recherche de nids de la salamandre à quatre orteils (*Hemidactylum scutatum*), une méthode simple et efficace pour trouver cette espèce rare au Québec », *Le Naturaliste canadien*, 129 (2) : 31-33.
- FARASHI, A. et M. ALIZADEH-NOUGHANI (2023). Basic introduction to species distribution modelling (p. 21-40), dans: Dhyani, S., D. Adhikari, R. Dasgupta et R. Kadaverugu (éditeurs). *Ecosystem and species habitat modeling for conservation and restoration*, Springer, Singapore.
- FINK, J., X. GALLAGHER-DUVAL et M. VARIN (2021). *Revue de littérature, variables d'habitats et sources d'information pour développer un modèle de qualité d'habitat pour la salamandre à quatre orteils (hemidactylum scutatum)*, Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (CERFO), rapport 21-0957, 7 p.
- GESCHKE, J. (2019). *Modeling salamander habitat and connectivity in Durham and Orange Counties, North Carolina*. Master thesis, Nicholas School of the Environment, Duke University, North Carolina, USA, 77 pp + appendix.
- GOUVERNEMENT DU CANADA (2020). *BioSIM*, Service canadien des forêts [En ligne] [<https://cfs.nrcan.gc.ca/projets/133>] (Consulté le 24 novembre 2025).

- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC (2025a). *Évaluation de la qualité des habitats* [En ligne] [\[https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/faune/gestion-faune-habitats-fauniques/habitats-fauniques/evaluation-qualite-habitats\]](https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/faune/gestion-faune-habitats-fauniques/habitats-fauniques/evaluation-qualite-habitats) (Consulté le 24 novembre 2025).
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC (2025b). *Salamandre à quatre orteils* [En ligne] [\[https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/faune/animaux-sauvages-quebec/fiches-especes-fauniques/salamandre-quatre-orteils\]](https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/faune/animaux-sauvages-quebec/fiches-especes-fauniques/salamandre-quatre-orteils) (Consulté le 24 novembre 2025).
- HARRIS, R. N. (2005) *Hemidactylum scutatum* (p. 780-781), dans : Lannoo, M. (éditeur). *Amphibian declines: the conservation status of United States species*, University of California Press, Berkeley, California, USA.
- HERMAN, T. A. et J. L. BOUZAT (2016). "Range-wide phylogeography of the four-toed salamander: out of Appalachia and into the glacial aftermath", *Journal of Biogeography*, 43(4): 666-678.
- HERRMANN, H. L., K. J., BABBITT, M. J. BABER et R. G. CONGALTON (2005). "Effects of landscape characteristics on amphibian distribution in a forest-dominated landscape", *Biological Conservation*, 123(2): 139-149.
- MELCCFP (2018, mis à jour le 17 avril 2025). *Milieux humides potentiels*, ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs [Jeu de données], dans Données Québec [En ligne] [\[https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/milieux-humides-potentiels\]](https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/milieux-humides-potentiels) (Consulté le 24 novembre 2025).
- MELCCFP (2023). *Banque d'observations sur les reptiles et amphibiens du Québec (BORAQ)*, base de données internes, Direction des espèces fauniques menacées ou vulnérables, ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, gouvernement du Québec, Québec, extraction effectuée en mai 2023.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, DE LA FAUNE ET DES PARCS et CENTRE D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE EN FORESTIERIE DE SAINTE-FOY INC. (2025). *Différence entre cote ou clé de qualité de l'habitat, indice de qualité de l'habitat et modèle de répartition d'espèce*, gouvernement du Québec, Québec, 4 p.
- MRNF (2017, mis à jour le 6 mai 2025). *Carte écoforestière à jour*, ministère des Ressources naturelles et des Forêts [Jeu de données], dans Données Québec [En ligne] [\[https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/carte-ecoforestiere-avec-perturbations\]](https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/carte-ecoforestiere-avec-perturbations) (Consulté le 24 novembre 2025).
- MRNF (2019, mis à jour le 30 avril 2025). *Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ)*, ministère des Ressources naturelles et des Forêts [Jeu de données], dans Données Québec [En ligne] [\[https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/grhq\]](https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/grhq) (Consulté le 24 novembre 2025).
- MRNF (2020, mis à jour le 28 janvier 2025). *Indice d'humidité topographique issu du LiDAR*, ministère des Ressources naturelles et des Forêts [Jeu de données], dans Données Québec [En ligne] [\[https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/indice-humidite-topographique-issu-du-lidar\]](https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/indice-humidite-topographique-issu-du-lidar), (Consulté le 24 novembre 2025).
- NEILL, W. T. 1963. *Hemidactylum scutatum* (p. 2.1-2.2), dans : Hiemer, W. J. (éditeur), *Catalogue of American amphibians and reptiles*, American Society of Ichthyologists and Herpetologists, Bethesda, Maryland, USA.
- PETRANKA, J. W. (1998). *Salamanders of United States and Canada*, Smithsonian Institution Press, Washington D.C., USA, 587 p.
- PHILLIPS, S. J. (2017). *A brief tutorial on Maxent* [En ligne] [\[https://www.amnh.org/content/download/141371/2285439/file/LinC3_SpeciesDistModeling_Exp_df\]](https://www.amnh.org/content/download/141371/2285439/file/LinC3_SpeciesDistModeling_Exp_df) (Consulté le 24 novembre 2025).

- POULIOT, D. et J.-F. DESROCHES (2005). « Découverte de la Salamandre à quatre orteils, *Hemidactylium scutatum*, à Québec, Québec : limite nord-est de l'espèce sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent », *The Canadian Field-Naturalist*, 119(1) : 129-131.
- SAUGEY, D. A. et S. E. TRAUTH (1991). "Distribution and habitat utilization of the Four Toed Salamander, *Hemidactylium scutatum*, in the Ouachita Mountains of Arkansas", *Journal of the Arkansas Academy of Science*, 45: 88-91.
- SCHEFFERS, B. R. et C.A. PASZKOWSKI (2012). "The effects of urbanization on North American amphibian species: Identifying new directions for urban conservation", *Urban Ecosystems*, 15(1): 133-147.
- TRENHAM, P. C. et H. B. SHAFFER (2005). "Amphibian upland habitat use and its consequences for population viability", *Ecological Applications*, 15(4): 1158-1168.
- US EPA (2016). *Habitat Suitability Index (HSI)*, US Environmental Protection Agency, Atlantic Ecology Division [En ligne] [<https://archive.epa.gov/aed/html/research/scallop/web/html/hsi.html>] (Consulté le 24 novembre 2025).
- VARIN, M., BOURNIVAL, P., FINK, J. et B. CHALGHAF (2021). "Mapping vernal pools using Lidar data and multitemporal satellite imagery", *Wetlands*, 41(3): 34.
- VITALE, K. O. (2013). *Habitat use and seasonal movement patterns of four-toed salamanders (Hemidactylium scutatum) in Massachusetts*, Master thesis, Graduate School, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts, USA, 46 p.
- WAHL, G.W., R. N., HARRIS et T. NELMS (2008). "Nest site selection and embryonic survival in four-toed salamanders, *Hemidactylium scutatum* (Caudata: Plethodontidae)", *Herpetologica*, 64: 12-19.
- WAKE, D.B. et I.G. DRESNER (1967). "Functional morphology and evolution of tail autotomy in salamanders", *Journal of Morphology*, 122: 265-306.
- WELSH, JR., H. H. et S. DROEGE (2001). "A case using Plethodontid salamanders for monitoring biodiversity and ecosystem integrity in North American Forests", *Conservation Biology*, 15(3): 558-569.

**Environnement,
Lutte contre
les changements
climatiques,
Faune et Parcs**

Québec 