
Modélisation de la connectivité de l'habitat
terrestre dans les basses-terres du Saint-Laurent
selon différents scénarios de changements
climatiques et d'occupation des sols



Mont Yamaska 2007, Photo: Tingxian Li (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques)

Modélisation de la connectivité de l'habitat terrestre dans les basses-terres du Saint-Laurent selon différents scénarios de changements climatiques et d'occupation des sols

8 juillet 2021

Bronwyn Rayfield¹, Guillaume Larocque^{2,3}, Kyle T. Martins⁴, Valentin Lucet², Colin Daniel¹ &

Andrew Gonzalez^{2,3,4}

¹ Apex Resource Management Solutions Ltd

² Département de biologie, Université McGill

³ Centre de la science de la biodiversité du Québec

⁴ Habitat

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés avec le soutien financier de la Direction générale de la conservation de la biodiversité du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) dans le cadre de la mise en œuvre de la Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques. Ce projet est rendu possible en partie grâce à l'aide de Calcul Québec (www.calculquebec.ca) et Calcul Canada (www.computecanada.ca). Nous remercions Yan Boulanger, Junior Tremblay et Jesus Pascual pour le partage du modèle de paysage forestier LANDIS-II du sud du Québec et pour leur soutien avec les modèles.

Table des matières

1 Sommaire exécutif	4
2 Introduction	5
3 Méthodes	6
3.1 Aperçu de l'approche.....	6
3.2 Zone l'étude	6
3.3 Sources des données	6
3.4 Changements dans le paysage	9
3.5 Analyses de la qualité des habitats et de la connectivité pour les espèces cibles.....	12
3.6 Scénarios de changements d'occupation des sols et de changements climatiques	14
3.7 Paramètres d'exécution de la simulation	15
3.8 Priorisation de conservation	15
4 Résultats.....	17
4.1 Projection de l'occupation des sols.....	17
4.2 Projection d'habitat des espèces cibles	19
4.3 Projection de la connectivité écologique pour les basses-terres du Saint-Laurent.....	23
4.4 Priorités de conservation	29
5 Conclusions et recommandations.....	31
Références	33

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques et préférences d’habitat pour les cinq espèces cibles.....	13
Tableau 2. Scénarios d’occupation des sols et de changements climatiques	14
Tableau 3. Évolution de la connectivité écologique moyenne de 2010 à 2110	24

Liste des figures

Figure 1. Diagramme de flux de travail.....	8
Figure 2. Délimitation complète de la province naturelle des basses-terres du Saint-Laurent au Québec.....	10
Figure 3. Classe d’occupation des sols de chaque pixel.....	16
Figure 4. Probabilité que chaque pixel de forêt et de milieu humide soit converti	18
Figure 5. Proportion annuelle de la superficie totale du paysage dans chaque classe d’occupation des sols.....	19
Figure 6. Probabilité moyenne d’habitat synthétisée pour toutes les espèces cibles	20
Figure 7. Caractéristiques spatiales des habitats des cinq espèces cibles.....	22
Figure 8. Exemple de carte de flux du courant pour la grande musaraigne.....	23
Figure 9. Changements attendus dans la connectivité écologique	25
Figure 10. Pourcentage de changements attendus dans la connectivité.....	27
Figure 11. Priorités de conservation des milieux naturels des basses-terres du Saint-Laurent ...	28
Figure 12. Proportion des zones hautement prioritaires (17 %) dans chaque district écologique .	30

1 Sommaire exécutif

Nous avons développé un modèle intégré combinant des simulations de changements d'occupation des sols et de changements forestiers, des projections climatiques régionales, des analyses de la connectivité des habitats multiespèces et une priorisation de la conservation. Nous avons appliqué ce modèle afin de prédire la connectivité écologique au cours du prochain siècle selon une gamme de scénarios climatiques et de changements d'occupation des sols dans la province naturelle des basses-terres du Saint-Laurent au Québec (30 000 km²). Nos résultats illustrent les conséquences potentielles des changements climatiques et de l'expansion urbaine pour la biodiversité associée aux forêts et aux milieux humides au sein de ce paysage, en se basant sur des analyses de qualité des habitats et de connectivité pour cinq espèces cibles : la grande musaraigne, la martre d'Amérique, la salamandre rayée, la grenouille des bois et l'ours noir. Nos analyses ont conduit à cinq conclusions principales :

1. Le principal moteur de perte et de fragmentation des habitats dans notre modèle est l'urbanisation, avec des pertes anticipées de 16 % pour les forêts et de 8 % pour les milieux humides entre 2010 et 2110, sur la base d'un scénario de changements d'occupation des sols suivant les tendances historiques (scénario statu quo). Les petits fragments de forêt proches des zones urbaines étaient les plus susceptibles d'être perdus.
2. La connectivité écologique devrait décliner dans les basses-terres du Saint-Laurent au cours du prochain siècle selon le scénario le plus extrême que nous avons testé, soit le maintien du statu quo et le scénario climatique RCP 8.5. L'ampleur des pertes de connectivité varie selon les espèces cibles et à travers les basses-terres, allant de 1 % à 12 %. Les pertes de connectivité sont associées au déclin et à la fragmentation des habitats convenables, principalement causées par l'expansion urbaine et les changements climatiques.
3. Quatre espèces cibles ont été plus négativement affectées par les changements d'occupation des sols que par les changements climatiques dans notre simulation de 100 ans. La conservation à long terme de ces espèces et de la biodiversité qu'elles représentent nécessitera une réduction des taux de conversion des terres et la restauration des habitats afin de compenser la perte continue observée aujourd'hui.
4. La martre d'Amérique a connu une perte et une fragmentation des habitats plus élevées en raison des changements climatiques qu'en raison des changements d'occupation des sols au cours de la période simulée. La réponse de cette espèce est caractéristique de celle d'autres espèces dont les niches écologiques sont menacées par les changements climatiques.
5. L'intégration d'autres scénarios de changements climatiques et d'occupation des sols dans la priorisation de la conservation modifie fortement les zones prioritaires. Une priorité plus élevée a été accordée aux zones naturelles fortement susceptibles de disparaître en raison des changements d'occupation des sols ou climatiques, telles que celles situées à proximité des centres urbains. Une priorité a également été accordée aux zones où la qualité des habitats et l'importance de la connectivité devraient augmenter du fait des changements dans le paysage et le climat, comme le corridor faunique situé entre Trois-Rivières et la ville de Québec.

2 Introduction

La biodiversité est menacée par la perte et la fragmentation des habitats qui entravent le déplacement des animaux à travers le paysage. La protection ainsi que la restauration de la qualité et de la connectivité des habitats sont essentielles, mais également difficiles à cause des incertitudes associées aux changements climatiques et aux changements d'occupation des sols. Dans la province naturelle des basses-terres du Saint-Laurent au Québec, les habitats forestiers ont subi une perte et une fragmentation importantes en raison de l'urbanisation et de l'expansion agricole. Plus cette tendance se poursuivra, plus la conservation des réseaux connectés d'habitats forestiers deviendra importante pour la pérennité de la biodiversité forestière. La connectivité à l'échelle des basses-terres jouera également un rôle important dans la réponse des espèces aux changements climatiques dans la région puisqu'on s'attend à ce que ces changements forcent de nombreuses espèces à se déplacer de la chaîne de montagnes des Appalaches vers celles des Laurentides. Des résultats encourageants pour la biodiversité des basses-terres du Saint-Laurent sont attendus si la priorisation des parcelles d'habitat et des corridors de dispersion est réalisée en fonction de leur contribution à la connectivité actuelle et future au sein du paysage.

Le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) a lancé une étude en 2017 pour examiner la connectivité des écosystèmes terrestres et aquatiques des basses-terres du Saint-Laurent, sur la base du cadre de conservation de la connectivité présenté par Albert et al. (2017). La connectivité terrestre a été évaluée à l'aide d'une approche par espèces cibles. Cinq espèces cibles ont ainsi été sélectionnées sur la base de leurs profils écologiques jugés représentatifs des besoins en habitat et en connectivité de la faune forestière dans les basses-terres du Saint-Laurent (Albert et al. 2017, Meurant et al. 2018) : la grande musaraigne, la martre d'Amérique, la salamandre rayée, la grenouille des bois et l'ours noir. La phase 1 du projet a permis de réaliser une analyse préliminaire de la qualité et de la connectivité des parcelles d'habitat forestier pour les cinq espèces cibles dans les basses-terres en fonction de l'occupation des sols actuelle (c.-à-d. en 2016; Rayfield et al. 2018). La phase 2 a identifié les fragments forestiers et les corridors de dispersion prioritaires pour la conservation dans les basses-terres en fonction de leur contribution globale à la qualité et à la connectivité des habitats forestiers pour les cinq espèces cibles, toujours en fonction de l'occupation des sols actuelle (Rayfield et al. 2019).

Dans cette étude, qui constitue la phase 3 du projet, nous simulons l'occupation des sols dans les basses-terres selon divers scénarios de changements climatiques et d'occupation des sols, et ce, afin d'examiner la qualité potentielle et la connectivité des habitats pour l'ensemble des espèces cibles étudiées. Ces simulations de paysage nous permettent d'établir une base solide de priorités de conservation dans les basses-terres du Saint-Laurent qui réduit au minimum le risque de dégradation de la qualité de l'habitat et de perte de connectivité compte tenu des changements anticipés sur le plan de l'occupation des sols et du climat. Ce rapport donne un aperçu des résultats de la simulation sous différents scénarios climatiques et d'occupation des sols synthétisés en fonction de l'occupation des sols, de la qualité des habitats, de la connectivité des habitats et des priorités pour la conservation de la connectivité.

3 Méthodes

3.1 Aperçu de l'approche

Nous avons utilisé une série d'étapes structurées sous forme de boucle pour la planification de la connectivité des paysages considérant l'impact des changements climatiques et des pressions de développement (figure 1). Nous avons élaboré un modèle de changements d'occupation des sols visant à prévoir les changements futurs relativement à l'utilisation du territoire et à la composition forestière, et intégrant des scénarios de prévisions climatiques et de changements d'occupations des sols. Les scénarios d'occupation des sols spécifiaient les taux de transition pour les différentes classes d'occupation : urbain, agriculture, milieu humide et forêt. Des scénarios climatiques régionaux ont été sélectionnés sur la base des modèles climatiques et des scénarios d'émission disponibles afin de caractériser une gamme de compositions forestières probable dans le futur. Les effets des scénarios climatiques et de changements d'occupation des sols ont été évalués en termes de qualité de l'habitat et de connectivité pour un ensemble d'espèces cibles représentatives (tableau 1). Les priorités de conservation ont été attribuées aux parcelles d'habitat et aux corridors de dispersion en fonction de leurs contributions, actuelles ou projetées, à la qualité de l'habitat et à la connectivité pour toutes les espèces cibles. Dans ce projet, nous avons mis en œuvre la boucle complète du flux de travail illustré à la figure 1, en commençant par les scénarios climatiques et de changements de l'occupation des sols et en terminant par l'identification des priorités de conservation.

3.2 Zone d'étude

La zone d'étude comprend la majorité de la province naturelle des basses-terres du Saint-Laurent au Québec, incluant Montréal à l'ouest et la ville de Québec à l'est (figure 2). Elle comprend également une zone tampon de 60 km autour des basses-terres du Saint-Laurent, à l'intérieur du Québec, afin de réduire les effets de bordure dans les analyses de connectivité (figure A1 en annexe). Comme dans Rayfield et al. (2019), la partie ouest des basses-terres qui comprend la région naturelle de la plaine d'Ottawa n'est pas incluse dans la zone d'étude. L'aire d'étude totale dans les basses-terres du Saint-Laurent s'étend sur 2 844 472 ha (28 445 km²).

3.3 Sources des données

Un tableau résumant toutes les sources des données est fourni dans le tableau A1 en annexe. Toutes les données ont été converties en une résolution de 90 x 90 m, ce qui a donné 8 675 303 pixels dans le modèle de simulation d'occupations des sols (3 512 921 dans les basses-terres du Saint-Laurent et 5 162 382 dans la zone tampon).

Occupation des sols

Les données historiques d'occupation des sols proviennent de la base de données d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) pour les années 1990, 2000 et 2010 (AAC 2015). Les données matricielles d'occupation des sols d'AAC couvrent la totalité de la zone d'étude et de la zone tampon des basses-terres du Saint-Laurent à une résolution de 30 x 30 m (figure A1 en annexe). Les classes d'occupation d'AAC ont été combinées en un ensemble de classes d'occupations simplifiées (tableau A2 en annexe). Ces classes simplifiées étaient plus grossières que celles utilisées dans la phase 2 (Rayfield et al. 2019). Par exemple, les classes de composition forestière (feuillus, mixtes et résineux) ont été regroupées en une seule classe de forêt. Il est à noter que certaines aires naturelles ont été classées comme urbaines dans les données d'AAC (2015) et n'ont pas été incluses dans l'analyse, comme les parcs forestiers de l'île de Montréal (p. ex., le parc du Mont-Royal).

Les données routières ont été obtenues sous forme vectorielle (ligne) à partir d'Adresses Québec (ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles [MERN] 2018). Les routes principales ont été pixellisées à une résolution de 90 x 90 m, garantissant le maintien de la contiguïté des routes, puis superposées à la carte d'occupation des sols de 2010 d'AAC. Les pixels des données routières étaient statiques; ils n'ont pas été convertis en d'autres classes d'occupation des sols lors des simulations.

Âge et composition de la forêt

L'âge et la composition des forêts correspondant à l'année 2010 ont été obtenus à partir de l'inventaire écoforestier du troisième décennal du Système d'information écoforestière (SIEF) [ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs {MFFP} 2011]. Ces caractéristiques associées à chaque pixel de forêt ont été superposées aux données matricielles d'occupation des sols de 2010 d'AAC.

Limites administratives et écologiques

Les limites des municipalités régionales de comté (MRC) ont été obtenues à partir de Données Québec (MERN 2019; figure A2 en annexe). Les limites écologiques proviennent du Cadre écologique de référence du Québec (CERQ) (Direction de l'expertise en biodiversité [DEB] 2018; figure 2), qui est classé comme suit, de l'échelle la plus large à l'échelle la plus fine : la province naturelle (niv. 1), la région naturelle (niv. 2), l'ensemble physiographique (niv. 3) et le district écologique (niv. 4). Les basses-terres du Saint-Laurent correspondent à l'échelle géographique la plus large de l'analyse, celle de la province naturelle.

Aires protégées

Les données d'aires protégées sont issues du Registre des aires protégées au Québec (MELCC 2019) et du Répertoire des milieux naturels protégés en terres privées (Réseau de milieux naturels protégés [RMN] 2019; figure A3 en annexe).

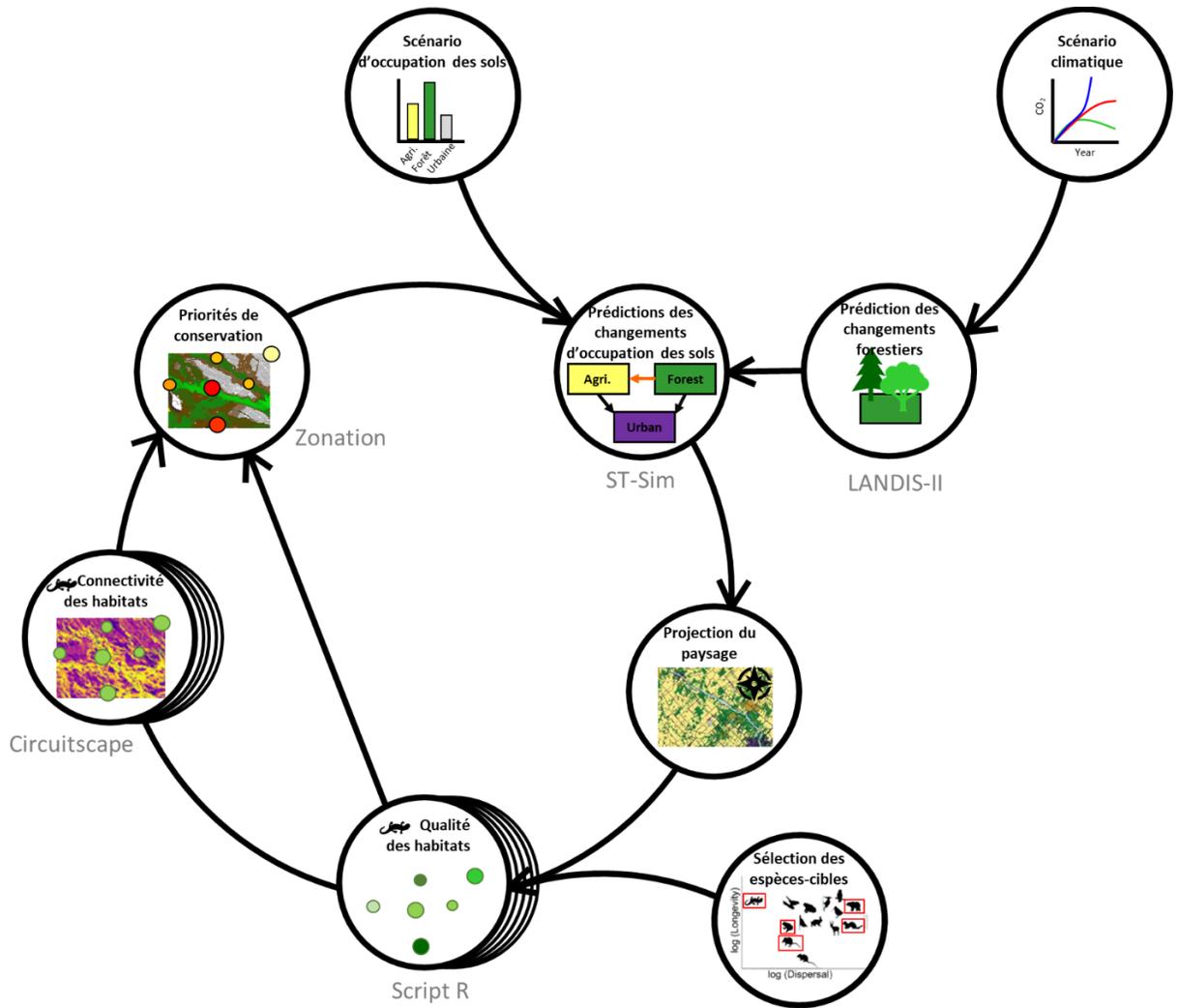


Figure 1. Diagramme de flux de travail pour la planification de la connectivité des paysages considérant l'impact des changements climatiques et des pressions de développement. Les priorités de conservation sont dérivées d'une série d'étapes structurées sous forme de boucle; les logiciels/scripts sont indiqués pour chaque étape. Les scénarios climatiques et de changements d'occupation des sols alimentent les modèles de prédiction de la composition forestière et des changements d'occupation des sols et sont à leur tour combinés pour produire des projections à l'échelle du territoire. Ces cartes de projection de l'occupation des sols sont à la base des analyses de la qualité et de la connectivité des habitats spécifiques aux espèces cibles sélectionnées. La priorisation des zones de conservation tient compte d'une part des exigences en matière de qualité et de connectivité des habitats à plusieurs échelles pour toutes les espèces cibles et d'autre part, de la vulnérabilité des habitats aux changements d'occupation des sols et du maintien de la qualité des habitats sous différents scénarios climatiques. Les cartes présentant les priorités de conservation peuvent enfin être combinées avec des scénarios de changements d'occupation des sols pour refaire la boucle d'analyses et ainsi tester l'efficacité de la conservation des zones prioritaires à maintenir la qualité et la connectivité des habitats.

Espèces cibles

Les données relatives aux espèces cibles, incluant leur capacité de dispersion maximale (tableau 1), les paramètres de qualité des habitats (tableau A3 en annexe), les paramètres de résistance du paysage (tableau A4 en annexe) et la taille minimale de la parcelle d'habitat (tableau 1), ont été obtenues à partir de valeurs publiées antérieurement (dans Albert et al. 2017, sur la base d'une revue exhaustive de la littérature scientifique).

3.4 Changements dans le paysage

Aperçu du modèle de changements d'occupation des sols

Nous avons modélisé les futurs changements dans le paysage en fonction des données historiques d'occupation des sols afin d'évaluer leurs impacts potentiels sur la qualité des habitats et la connectivité écologique. Nous avons commencé par développer un modèle stochastique axé sur deux sources majeures de changement d'occupation des sols dans la région : l'expansion agricole et l'urbanisation. L'expansion agricole se produit lorsque les pixels de forêt ou de milieu humide (boisé ou ouvert) changent pour de l'agriculture. L'urbanisation se produit lorsque les pixels de forêt, de milieu humide (boisé ou ouvert) ou d'agriculture changent pour de l'usage urbain (voir le tableau A2 en annexe pour une description des classes d'occupation des sols et leur correspondance avec celles utilisées par Rayfield et al. 2019). Les taux de transition d'occupation des sols ont été calculés à l'aide des données géospatiales d'AAC (2015) à l'échelle de chacune des 68 MRC (MERN 2017; figure A2 en annexe) de la zone d'étude. Nous avons testé les performances du modèle en comparant les taux de transition simulés avec les tendances observées dans les données historiques d'occupation des sols (1990-2010). Nous avons ensuite pris les taux de transition calculés de 2000 à 2010 et les avons projetés sur un horizon temporel de 100 ans (2010-2110) pour les basses-terres et la zone tampon.

Nous avons émis plusieurs hypothèses lors du développement du modèle d'occupation des sols. Par exemple, le modèle suppose que la perte de milieux naturels (c.-à-d. forêts et milieux humides) liée à l'intensification agricole et à l'urbanisation se produit à un rythme constant et de façon circulaire à partir des secteurs du paysage ayant le même type d'occupation des sols. Ainsi, les pixels voisins de ceux à usage urbain ou agricole ont reçu une probabilité plus élevée de transition vers de l'usage urbain ou agricole, respectivement. Le modèle suppose également que les milieux naturels étant protégés aujourd'hui le resteront à l'avenir, ce qui contraint les pixels ainsi désignés à garder la même occupation des sols (c.-à-d. forêts ou milieux humides). Les délimitations des aires actuellement protégées proviennent du MELCC (MELCC 2018).

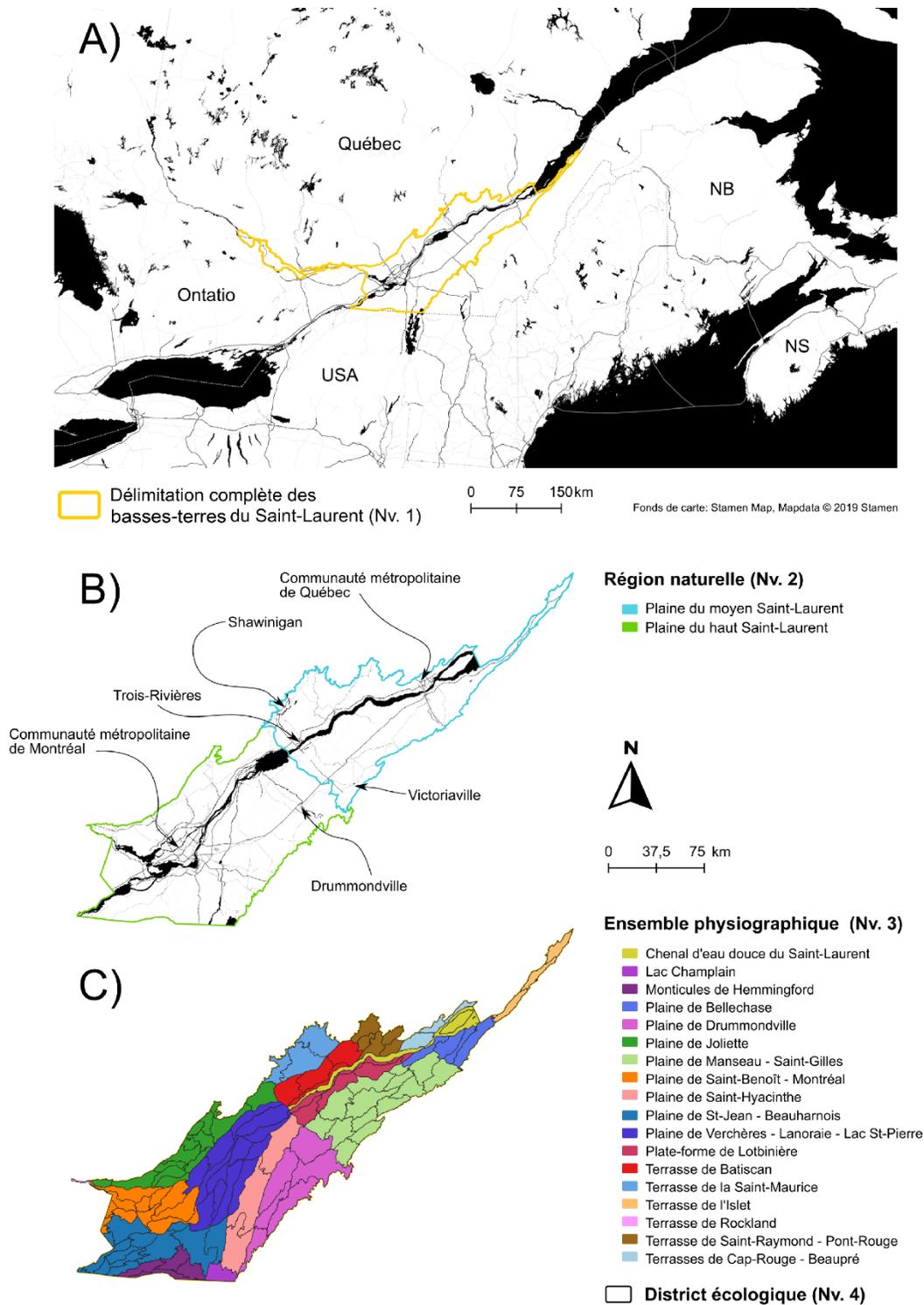


Figure 2. Délimitation complète (A) de la province naturelle des basses-terres du Saint-Laurent au Québec à l'échelle de la partie est de l'Amérique du Nord, ainsi que des (B) régions naturelles, (C) régions physiographiques et districts écologiques qui composent cette aire d'étude. La figure 2B illustre la localisation des principales villes à l'intérieur de l'aire d'étude.

Effets des changements climatiques sur la composition forestière

Par rapport à l'aire de répartition des différentes espèces cibles choisies pour cette analyse, l'étendue des basses-terres du Saint-Laurent est relativement petite. Nous prévoyons qu'à cette échelle d'étude, les espèces cibles ne connaîtront pas de forts changements de répartition directement liés aux changements de température ou de précipitations causés par les changements climatiques (Albert et al. 2017). Par ailleurs, nous supposons que les modifications dans les zones occupées par ces espèces seront induites par des changements dans la distribution des habitats de qualité en réponse aux changements climatiques et aux pressions de développement. Étant donné que les facteurs les plus importants de la qualité de l'habitat pour nos espèces cibles sont la présence, le type et la densité des forêts, nous concentrons notre analyse sur la modélisation de la répartition des forêts en réponse aux changements climatiques.

Le modèle de paysage forestier LANDIS-II (<http://www.landis-ii.org/>) est un outil de modélisation de pointe qui simule les changements forestiers en fonction de la croissance et de la succession forestières, des perturbations et de l'aménagement forestier. Le climat et les changements climatiques affectent les processus dans tout le modèle. L'équipe dirigée par Yan Boulanger de Ressources naturelles Canada utilise LANDIS-II pour divers projets de modélisation des changements forestiers au Québec et au Canada (Boulanger et al. 2017, 2018, 2019). Elle a récemment développé un modèle qui cible spécifiquement le sud du Québec (Boulanger et Puigdevall 2021). Ses analyses, menées à une résolution de 250 m, modélisent la distribution de 11 espèces d'arbres en réponse aux changements climatiques, à la dynamique de succession, aux types de sols, ainsi qu'aux perturbations causées par le vent, le feu et les épidémies de tordeuses des bourgeons de l'épinette, pour la période 2000–2200. Son approche utilise un scénario climatique de référence et deux scénarios climatiques dont les niveaux de CO₂ atmosphérique diffèrent, à savoir RCP 4.5 et RCP 8.5 (où RCP désigne « *Representative Concentration Pathways* »; van Vuuren et al. 2011). Les projections climatiques pour 2010-2100 pour chaque RCP, telles que simulées par le modèle canadien du système terrestre de deuxième génération (CanESM2; Arora et Boer 2010), proviennent des archives de la phase 5 du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP5 pour « *Coupled model intercomparison project* ») du Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC). Leurs analyses ont généré une série de cartes matricielles contenant des estimations de la biomasse de chaque espèce d'arbre pour chaque période et chaque scénario. Celles-ci peuvent ensuite être combinées afin d'illustrer les proportions d'espèces feuillues, résineuses et mixtes associées à chacun des scénarios climatiques.

Avec la collaboration de l'équipe de Yan Boulanger, nous avons adapté l'approche relative aux basses-terres du Saint-Laurent à une résolution plus fine de 90 m. Nous avons exécuté 100 itérations de chaque scénario climatique pour générer des cartes représentant les types de couverts forestiers feuillus, résineux et mixtes, ainsi que la biomasse ligneuse pour 2030, 2050, 2070, 2090 et 2110. Le modèle de changement forestier LANDIS-II était utilisé pour estimer les probabilités de transition entre les différentes classes de couvert forestier dans chaque

scénario climatique. Les probabilités de transition des pixels de forêt entre les classes de composition de feuillus, mixtes et résineux ont été spécifiées par groupe d'âge (jeune, intermédiaire, vieille; tableau 1), par type de terrain (Boulangier et al. 2019) et par période de 20ans pour chaque scénario climatique. Ainsi, cette approche permet de modéliser à la fois la quantité et l'organisation spatiale des pixels de forêt, déterminées par les changements d'occupation des sols, et les changements dans la composition des pixels de forêt, dictés par les changements climatiques.

3.5 Analyses de la qualité des habitats et de la connectivité pour les espèces cibles

Des modèles ont été utilisés pour évaluer les besoins en matière d'habitat pour chaque espèce cible en fonction de différents facteurs environnementaux (p. ex., couverture terrestre, type et âge des forêts; tableau 1, tableau A3 en annexe) suivant l'approche de Albert et al. (2017) et Rayfield et al. (2019). À l'aide de ces résultats, nous avons délimité des parcelles en regroupant les pixels d'habitat contigus, en ne retenant que les parcelles pour lesquelles la superficie répondait aux exigences minimales pour chaque espèce cible (tableau 1). Des valeurs de résistance spécifiques à chaque espèce cible ont été attribuées à chacune des classes d'occupation des sols, afin de modéliser la perméabilité au mouvement des espèces étudiées (tableau A4 en annexe). Plus de détails sur les méthodes utilisées pour générer des cartes de qualité de l'habitat, de parcelles d'habitat et de résistance peuvent être trouvés dans Albert et al. (2017) et Rayfield et al. (2019).

Les modèles d'habitat utilisés dans ce projet ont été simplifiés par rapport à ceux utilisés dans la phase 2, et ce, afin de pouvoir inclure l'évaluation des habitats de toutes les espèces cibles, les réalisations de Monte-Carlo, les pas de temps et les différents scénarios. La principale différence avec la phase 2 est que les modèles d'habitat incluait des multiplicateurs spatiaux pour diminuer la qualité d'habitat de certains pixels en fonction de considérations spatiales telles que la distance aux routes ou à la lisière de la forêt.

La connectivité des habitats a été évaluée à l'aide d'une analyse de circuit, en se basant sur les cartes de résistance spécifiques à chaque espèce cible, suivant la méthode de Rayfield et al. (2019). Cette analyse mesure la « traversabilité » du paysage en fonction de la conductance de chaque pixel (McRae et al. 2008). La conductance est donnée par l'inverse de la résistance. Nous avons calculé la valeur de connectivité de chaque pixel en fonction du flux (c.-à-d. de la densité) du courant à travers le paysage. Nous avons utilisé une analyse de circuit dite « de mur à mur » et sans découpage de la zone d'étude, qui produit une carte de flux du courant omnidirectionnel (dans toutes les directions). Nous avons effectué toutes les analyses de connectivité de circuit à l'aide de Circuitscape (Julia 1.4 Circuitscape; McRae et al. 2009, Anantharaman et al. 2020).

Tableau 1. Caractéristiques et préférences d’habitat pour les cinq espèces cibles. Les préférences d’habitat (indiquées par un X) et les superficies minimales de parcelles d’habitat ont été utilisées pour identifier les habitats de chacune des espèces cibles dans les basses-terres du Saint-Laurent (adapté de Albert et al. 2017).

Nom commun	Nom scientifique	Ordre	Longévité (années)	Distance de dispersion max. (m)	Composition forestière ^a			Âge de la forêt ^b			Milieu humide	Taille min. de la parcelle (ha)
					F	M	R	J	I	V		
 Grande musaraigne	<i>Blarina brevicauda</i>	Insectivora	1,5	459	X	X			X	X		1
 Martre d’Amérique	<i>Martes americana</i>	Carnivora	7,0	46 659		X	X		X	X		150
 Salamandre rayée	<i>Plethodon cinereus</i>	Caudata	20,0	16	X	X		X	X	X		0,27
 Grenouille des bois	<i>Rana sylvatica</i>	Anura	3,5	564	X	X	X	X	X	X	X	0,5
 Ours noir	<i>Ursus americanus</i>	Carnivora	12,5	55 088	X	X	X	X	X	X	X	1 200

^a Abréviations : F, feuillus; M, mixte feuillus et résineux; R, résineux.

^b Abréviations : J, jeune (0 à 29 ans); I, intermédiaire (30 à 59 ans); V, vieille (60 ans et plus).

Les analyses de circuit dans ce projet sont l'une des nombreuses analyses de connectivité menées durant la phase 2. Cette phase précédente du projet incluait aussi des analyses de réseau pour cerner les parcelles d'habitat importantes pour la connectivité à courte et à longue distance. Toutefois, plusieurs de ces analyses n'étaient pas réalisables dans la phase actuelle du projet qui inclut l'évaluation des habitats de toutes les espèces cibles, les réalisations de modèles de simulation (réalisations de Monte-Carlo), les pas de temps et les différents scénarios.

3.6 Scénarios de changements d'occupation des sols et de changements climatiques

Nous avons testé six scénarios, combinant deux scénarios de changements d'occupation des sols avec trois scénarios de changements climatiques (tableau 2). Les scénarios de changements d'occupation des sols étaient les suivants : 1) aucun changement par rapport à l'occupation des sols initiale de 2010 et 2) changements d'occupation des sols suivants les tendances historiques observées entre 2000 et 2010 (maintien du statu quo). Les scénarios climatiques étaient les suivants : 1) aucun changement par rapport au climat de 2010; 2) RCP 4.5; et 3) RCP 8.5. En plus de ces six scénarios, nous avons également testé un scénario de conservation où 26 % de la zone des basses-terres était protégée du développement (annexe, section 2 : scénario de conservation).

Tableau 2. Scénarios d'occupation des sols et de changements climatiques. Les identifiants (ID) des scénarios seront utilisés pour distinguer les scénarios dans la section des résultats. Les abréviations sont basées sur les descriptions anglaises : NC = No Change; BAU = Business-As-Usual.

ID du scénario	Scénario d'occupation des sols	Scénario climatique	Description
NC_NC	Aucun changement (NC)	Aucun changement (NC)	Scénario de référence sans changement
NC_45	Aucun changement (NC)	RCP 4.5 (45)	Scénario RCP 4.5 changements climatiques seulement
NC_85	Aucun changement (NC)	RCP 8.5 (85)	Scénario RCP 8.5 changements climatiques seulement
BAU_NC	Statu quo (BAU)	Aucun changement (NC)	Scénario maintien du statu quo (BAU) pour l'occupation des sols + aucun changement pour le climat
BAU_45	Statu quo (BAU)	RCP 4.5 (45)	Scénario de changement intermédiaire : maintien du statu quo (BAU) pour l'occupation des sols + scénario climatique RCP 4.5
BAU_85	Statu quo (BAU)	RCP 8.5 (85)	Scénario de changement extrême : maintien du statu quo (BAU) pour l'occupation des sols + scénario climatique RCP 8.5

3.7 Paramètres d'exécution de la simulation

Toutes les simulations ont été exécutées pour 100 ans (2010-2110) avec 40 réalisations de Monte-Carlo (itérations). Le changement du paysage a été modélisé à l'aide d'un pas de temps annuel tandis que la qualité des habitats, la connectivité et les priorités de conservation ont été évaluées tous les 20 ans. Toutes les simulations ont été exécutées à une résolution spatiale de 90 x 90 m. Toutes les simulations d'occupation des sols et les analyses d'habitat ont été générées à l'aide des progiciels ST-Sim (version 3.2.15) et ST-Connect (version 1.1.1) fonctionnant sous le logiciel SyncroSim (version 2.2.10).

3.8 Priorisation de conservation

Nous avons effectué une priorisation de la conservation visant à synthétiser les résultats des analyses de l'habitat et de la connectivité pour toutes les espèces, toutes les périodes et tous les scénarios. Nous avons ainsi réalisé une évaluation de la priorisation spatiale pour la conservation des forêts et des milieux humides des basses-terres du Saint-Laurent en nous basant sur la qualité des habitats et la connectivité actuelles et projetées et selon les scénarios d'occupation des sols et de changements climatiques. La priorisation a été réalisée à partir du scénario de maintien du statu quo pour l'occupation des sols, mais pour lequel aucun changement climatique n'est considéré (BAU_NC), et du scénario de changements climatiques extrêmes pour lequel aucun changement d'occupation des sols n'est intégré (NC_85). Nous avons comparé le changement (différence) dans la qualité et la connectivité des habitats au niveau du pixel entre 2010 et 2110 pour chaque espèce cible. L'interprétation des cartes illustrant les différences entre 2010 et 2110 dépend du moteur de changement, de l'occupation des sols ou du climat. Ainsi, toutes les zones dont la qualité de l'habitat ou le flux du courant ont changé en raison de l'occupation des sols sont considérées comme hautement prioritaires.

Soit ces zones sont importantes à l'heure actuelle, mais elles devraient perdre de la valeur en raison des changements d'occupation des sols projetés, soit elles ne sont pas importantes à l'heure actuelle, mais elles devraient gagner en valeur en raison des changements anticipés sur le territoire. En revanche, les zones affectées par des changements dans la qualité et la connectivité des habitats causés par les changements climatiques ne sont pas systématiquement hautement prioritaires. Par exemple, les zones de hautes qualité et connectivité des habitats dans les conditions climatiques actuelles pour lesquelles on anticipe une perte de la valeur en raison des changements climatiques sont moins prioritaires. Par contre, les zones qui sont actuellement de faible importance, mais qui devraient prendre de la valeur en raison des changements climatiques sont considérées comme hautement prioritaires. Nous avons utilisé le logiciel d'aide à la décision Zonation v4 (Moilanen 2014, 2011, 2005) avec la même règle additive et les mêmes paramètres de Zonation que lors de la phase 2 (Rayfield et al. 2019). Les aires protégées des basses-terres ont été considérées comme une couche de masque et apparaissent nécessairement dans la fraction supérieure des priorités. Les cartes de qualité et de connectivité des habitats actuelles et futures pour chacune des espèces cibles ont toutes reçues un poids égal à 1.

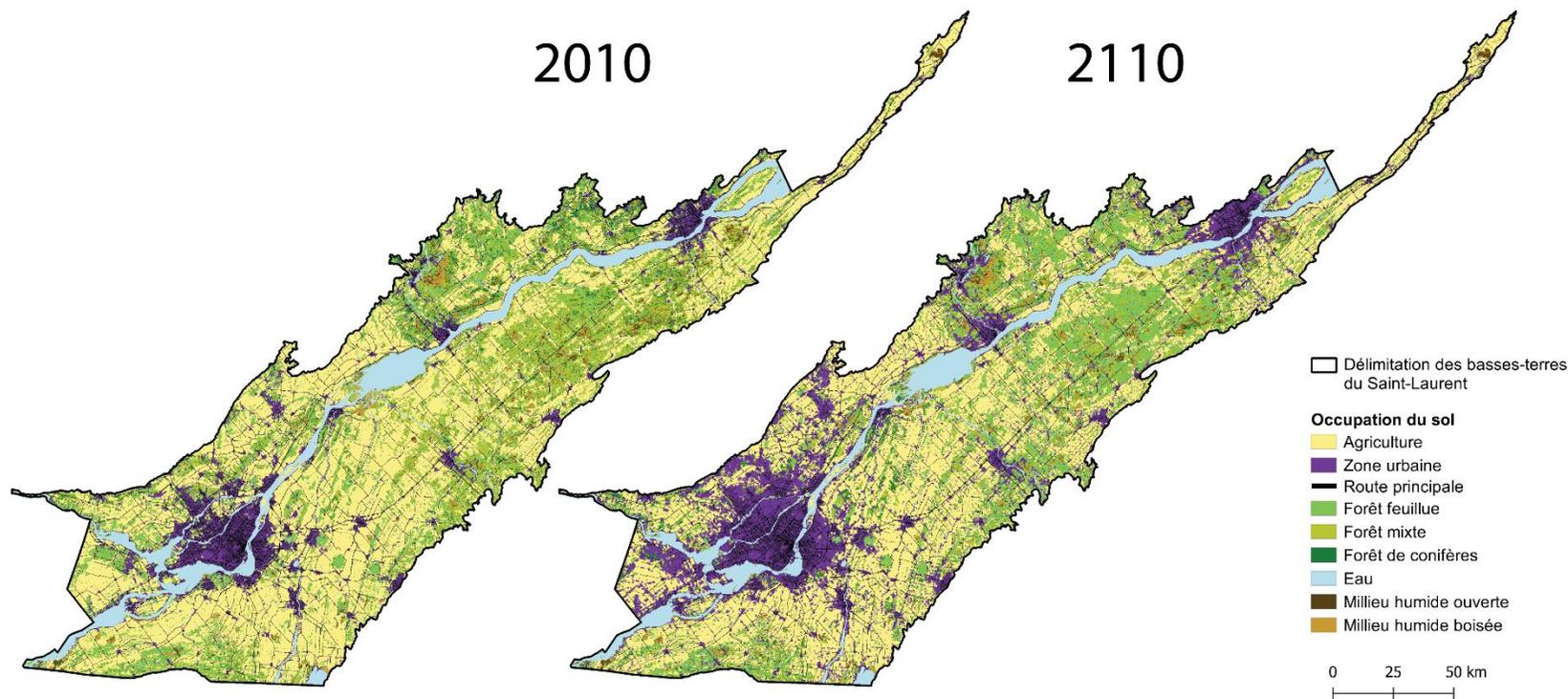


Figure 3. Classe d'occupation des sols de chaque pixel au début de la simulation en 2010 (pour toutes les réalisations) et à la fin de la simulation en 2110 (pour une seule réalisation) sous le scénario le plus extrême (scénario BAU_85). Les résultats présentés ici sont une projection de scénario pour l'occupation des sols dans les basses-terres du Saint-Laurent, et non une prédiction de l'état futur du paysage.

4 Résultats

Nous présentons ici un aperçu des résultats obtenus pour les six combinaisons de scénarios climatiques et de changements d'occupation des sols. Nous nous concentrons toutefois davantage sur le plus extrême des six scénarios – soit le scénario combinant le maintien du statu quo pour les changements d'occupation des sols et le scénario climatique RCP 8.5 (BAU_85) – et ses conséquences sur la connectivité écologique. Des résultats supplémentaires sont fournis dans la section 3 de l'annexe : résultats de connectivité supplémentaires. À noter que les résultats de changements d'occupation des sols présentés ici demeurent des projections de scénarios pour les basses-terres du Saint-Laurent et elles ne doivent en aucun cas être considérées comme des prédictions de l'état futur du paysage.

4.1 Projection de l'occupation des sols

Les projections pour 2110 résultant du scénario BAU_85 sont présentées à la figure 3 pour une seule réalisation de Monte-Carlo. Ce scénario illustre à la fois l'impact du maintien des tendances historiques des changements d'occupation des sols sur la quantité et l'organisation spatiale des forêts, et celui de changements climatiques extrêmes (RCP 8.5) sur la composition des forêts. On note une augmentation substantielle des zones urbaines, notamment autour des centres urbains comme Montréal, Trois-Rivières et la ville de Québec. Ce résultat est lié aux tendances historiques d'urbanisation observées et aux règles de contiguïté appliquées au modèle, et explique ainsi une plus grande probabilité d'urbanisation à proximité des zones urbaines existantes (figure 3). De plus, les forêts résineuses sont largement remplacées par des forêts mixtes et feuillues, en particulier dans la moitié nord des basses-terres – la plaine du moyen Saint-Laurent (figure 2). La composition de la forêt est principalement déterminée par le climat, la succession forestière et les taux historiques de gestion forestière.

Les figures 4 et 5 résument les effets du maintien des tendances historiques des changements d'occupation des sols sur l'état futur du paysage, en ne considérant aucun changement climatique (scénario BAU_NC). La figure 4 illustre la probabilité que chaque pixel de forêt ou de milieu humide soit converti en zones agricoles ou urbaines au cours des 100 prochaines années. Les forêts et les milieux humides adjacents aux zones urbaines existantes ont reçu la probabilité de conversion la plus élevée, en particulier ceux bordant les grands centres urbains de Montréal, de Trois-Rivières et de la ville de Québec (figure 4). C'est d'ailleurs ce qui explique l'inégale répartition de la conversion des forêts et des milieux humides lorsque les données sont comparées à l'échelle des différents districts écologiques (niv. 4) des basses-terres du Saint-Laurent (figure 5). Suivant les mêmes règles, les districts écologiques adjacents ou incluant des centres urbains ont reçu la plus haute probabilité de conversion. Enfin, sous ce même scénario de maintien du statu quo, nous observons des pertes projetées de forêts (-16 %), de milieux humides (-8 %), et de zones agricoles (-10 %) entre 2010 et 2110 dans l'ensemble des basses-terres du Saint-Laurent (figure 4). Cette perte en milieux naturels et agricoles s'accompagne d'une augmentation des zones urbaines (+34 %; figure 5).

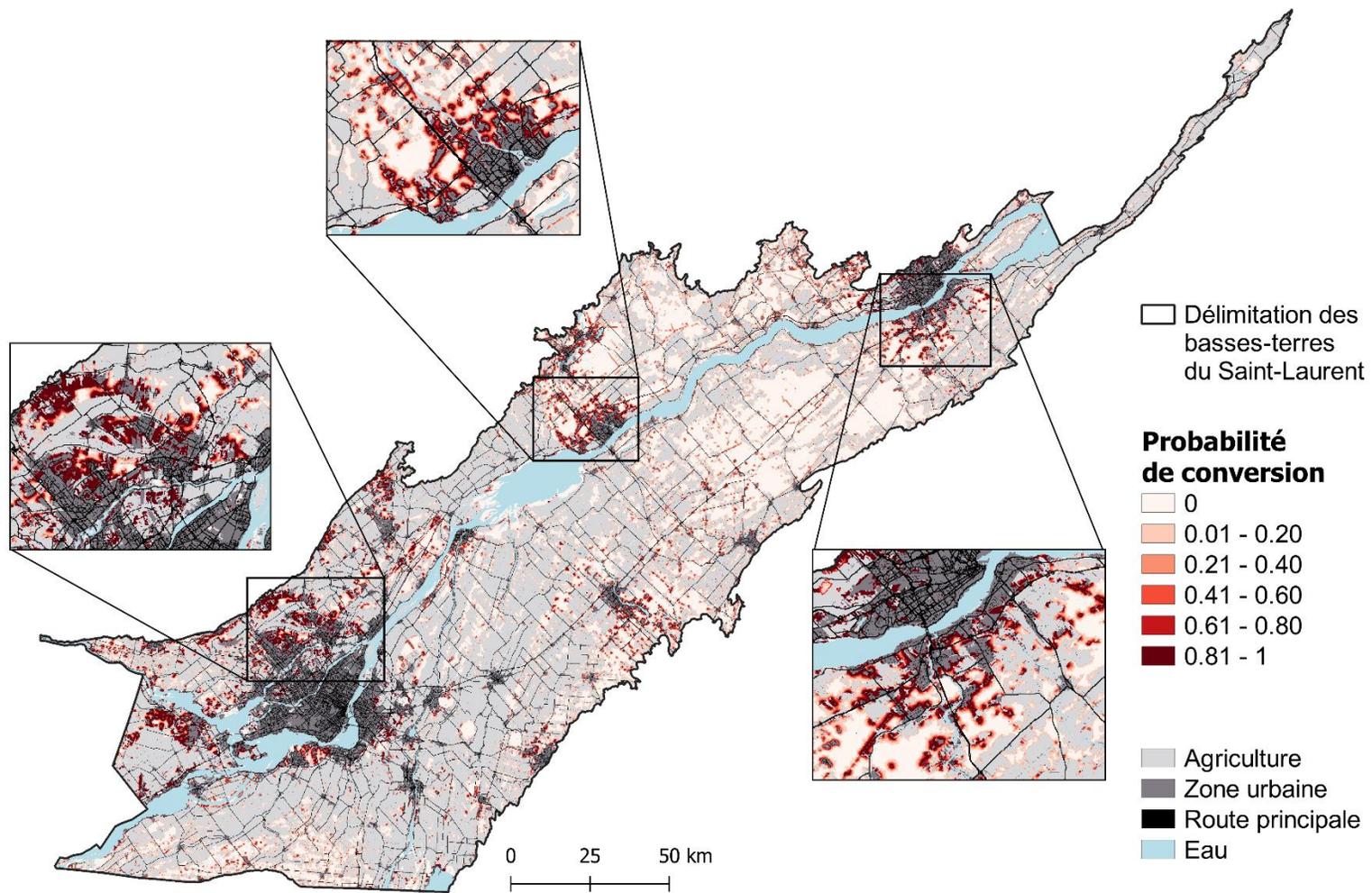


Figure 4. Probabilité que chaque pixel de forêts et de milieux humides soit converti en zones agricoles ou urbaines après 100 ans de simulation sous le scénario BAU_NC, correspondant à un maintien des tendances historiques des changements d'occupation des sols sans aucun changement climatique, calculée à partir de 40 réalisations de Monte-Carlo.

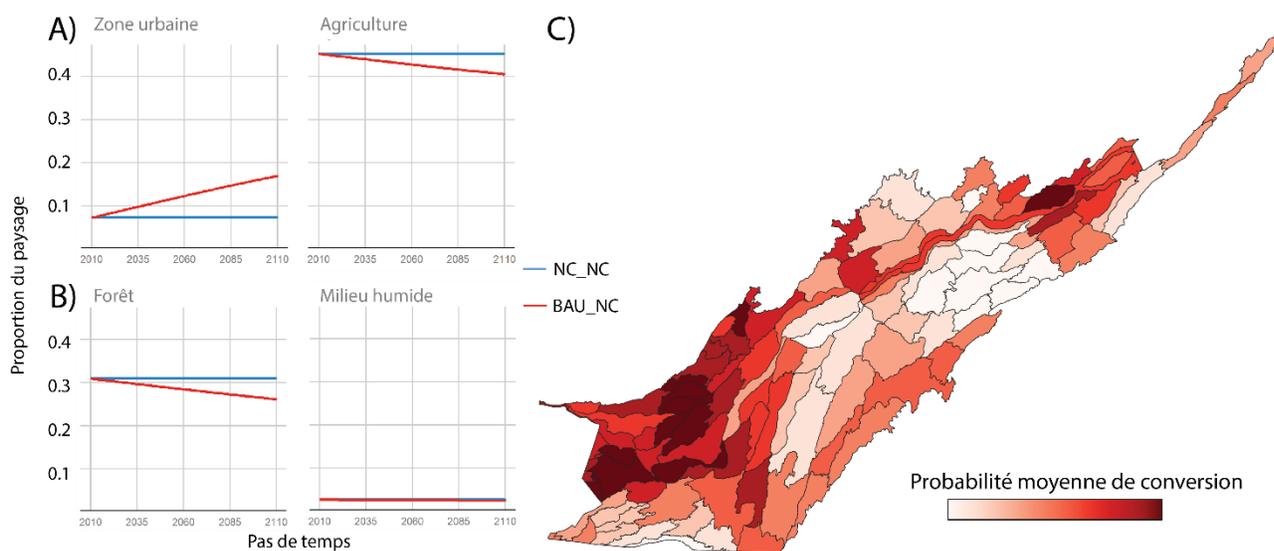


Figure 5. Proportion annuelle de la superficie totale du paysage dans chaque classe d'occupation des sols. pour A) les zones anthropiques et B) les zones naturelles, telle que projetée par les scénarios NC_NC (aucun changement) et BAU_NC pour l'ensemble des basses-terres du Saint-Laurent. Les lignes pleines indiquent la moyenne et les barres d'erreur (trop petites pour être visibles) indiquent l'intervalle de confiance à 95 % de Monte-Carlo sur 40 réalisations de Monte-Carlo. C) Probabilité moyenne de conversion des forêts et des milieux humides en zones agricoles ou urbaines pour chacun des districts écologiques après 100 ans de simulation sous le scénario BAU_NC, correspondant à un maintien des tendances historiques des changements d'occupation des sols sans aucun changement climatique, calculée à partir de 40 réalisations de Monte-Carlo.

4.2 Projection d'habitat des espèces cibles

Les projections d'habitat des espèces cibles étudiées reflètent à la fois les changements dans la quantité et l'organisation spatiale des pixels de forêt, influencés par les changements d'occupation des sols, et les changements dans la composition des pixels de forêt, principalement influencés par les changements climatiques. La figure 6 présente la probabilité moyenne d'habitat pour chacun des districts écologiques des basses-terres du Saint-Laurent, synthétisée pour toutes les espèces cibles et après 100 ans sous le scénario de changements le plus extrême (BAU_85). La probabilité d'habitat a été calculée pour chaque pixel et correspond à la probabilité que le pixel soit intégré à une parcelle d'habitat pour l'une des cinq espèces cibles. En 2110, la probabilité d'habitat a été calculée pour les 40 réalisations de Monte-Carlo.

Il existe un chevauchement des zones à plus forte probabilité d'habitat entre 2010 et 2110 selon le scénario BAU_85. Ces zones à forte probabilité d'habitat pour les cinq espèces cibles se trouvent au sud, dans les contreforts des Adirondacks et au nord, dans le grand complexe de

forêts et de milieux humides entre Trois-Rivières et Québec. De façon générale, les terres agricoles de la Montérégie ont reçu une probabilité d'habitat plus faible pour toutes les espèces cibles en 2010 et en 2110 selon le scénario BAU_85.

Nous observons une diminution de la probabilité d'habitat dans les districts écologiques qui ont des taux élevés de conversion projetée des milieux naturels en zones urbaines. La probabilité d'habitat diminue pour presque tous les districts écologiques entourant Montréal, particulièrement au nord et à l'ouest. La probabilité d'habitat diminue également dans les districts écologiques entourant la ville de Québec, particulièrement au nord, à l'est et au sud. La probabilité d'habitat demeure relativement élevée dans les contreforts des Adirondacks, les zones naturelles entre Trois-Rivières et Québec, et autour de Saint-Hyacinthe.

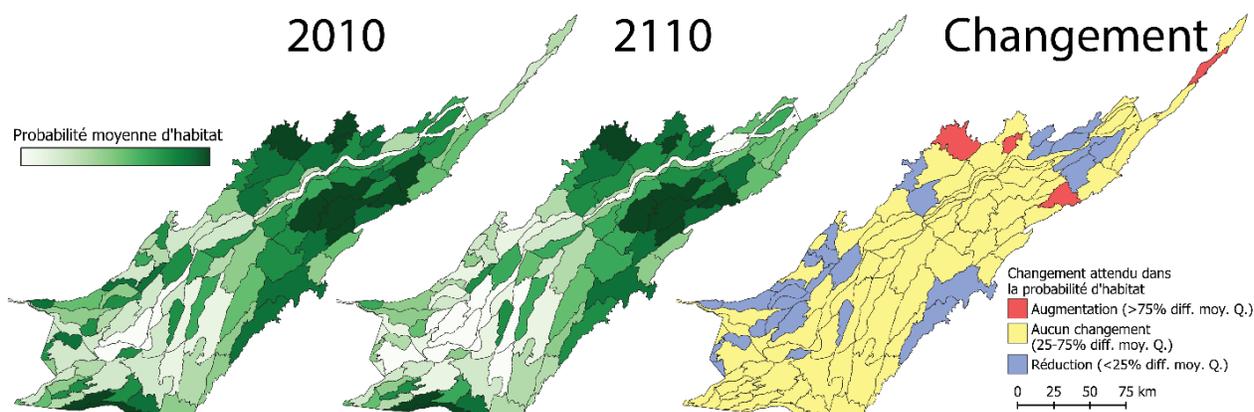


Figure 6. Probabilité moyenne d'habitat synthétisée pour toutes les espèces cibles et les réalisations de Monte-Carlo en 2010 et 2110 selon le scénario de changements le plus extrême (BAU_85). Le degré de changements anticipés dans la probabilité d'habitat entre 2010 et 2110 est représenté sur la carte de droite selon trois classes : augmentation de la probabilité de conversion (>75 % de différence moyenne), aucun changement (25 à 75 % de différence moyenne) et réduction de la probabilité de conversion (<25 % de différence moyenne). Les résultats sont cartographiés à l'échelle des districts écologiques.

L'habitat de chacune des espèces cibles répond de façon unique aux changements d'occupation des sols. Par conséquent, les résultats relatifs à l'habitat des espèces cibles sont présentés pour les six combinaisons de scénarios climatiques et de changements d'occupation des sols (figure 7). Pour la majorité des espèces cibles, la plupart des caractéristiques des habitats divergent au fil du temps selon les différents scénarios. La superficie totale de l'habitat reste constante ou diminue pour toutes les espèces pour tous les scénarios statu quo de changements d'occupation des sols (BAU). Dans les scénarios sans changement d'occupation des sols (NC), la superficie totale de l'habitat de la grande musaraigne, de la martre d'Amérique et de la salamandre rayée augmente. Ces tendances sont observées pour les espèces ayant des

préférences d'habitat plus limitées en fonction de la composition ou de l'âge de la forêt. L'habitat de la salamandre augmente à mesure que les forêts deviennent plus mixtes et feuillues (ce qui se produit même en absence de changements climatiques), tandis que l'habitat de la musaraigne et de la martre augmente à mesure que les forêts vieillissent au cours de la simulation de 100 ans. Les espèces ayant des préférences d'habitat plus généralisées, la grenouille et l'ours, perdent de leur habitat selon les scénarios statu quo de changements d'occupation des sols (BAU) dès que des zones naturelles sont perdues. Le nombre de parcelles d'habitat, la superficie moyenne des parcelles et le rapport moyen périmètre-surface constituent des caractéristiques importantes pour dresser le portrait de l'habitat structurel de chacune des espèces cibles. Par exemple, dans les scénarios statu quo de changement d'occupations des sols, l'habitat de la salamandre et de la grenouille devient de plus en plus fragmenté avec plus de parcelles d'habitat d'une plus petite superficie et ayant un rapport périmètre-surface plus élevé, indiquant des effets de bordure accrus. Les résultats sont similaires pour l'ours.

À l'exception de la martre d'Amérique, les espèces sont plus sensibles aux changements d'occupation des sols qu'aux changements climatiques, et ce, dans toutes les combinaisons de scénarios. Par exemple, pour la musaraigne, la superficie totale de l'habitat, le nombre de parcelles et la superficie moyenne des parcelles d'habitat sont plus affectés par les scénarios de changements d'occupation des sols que par les scénarios climatiques. Pour la martre, la superficie totale de l'habitat et la superficie moyenne des parcelles d'habitat sont davantage affectées par les scénarios climatiques que les scénarios d'occupation des sols. La superficie totale de l'habitat diminue initialement, mais revient ensuite à des niveaux initiaux inférieurs aux scénarios avec aucun changement climatique. La superficie totale de l'habitat et la taille moyenne des parcelles diminuent davantage sous les scénarios climatiques extrêmes RCP 4.5 et RCP 8.5. Cette réponse était prévisible puisque la martre préfère les forêts résineuses, dont la couverture diminue avec le temps dans les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.

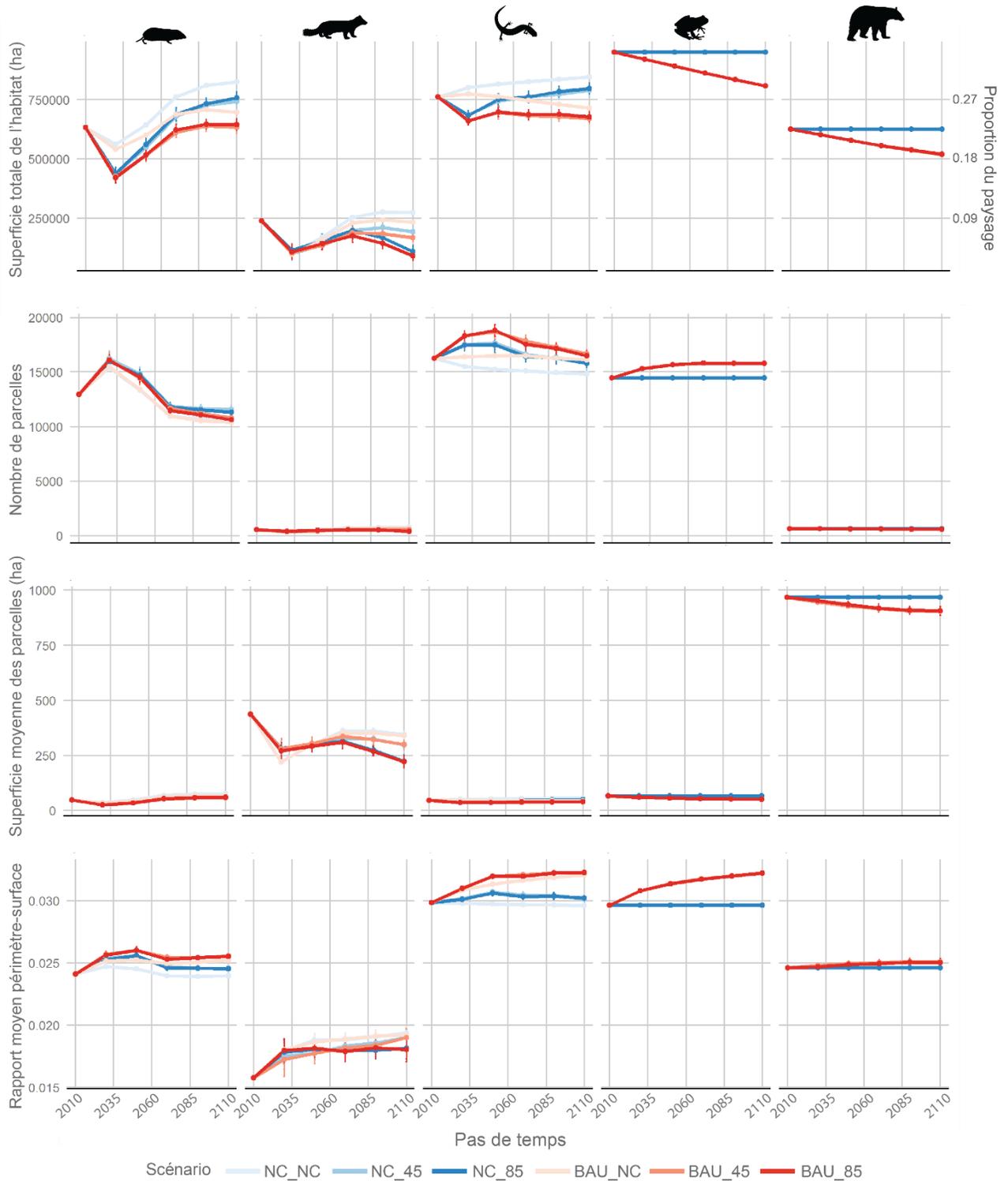


Figure 7. Caractéristiques spatiales des habitats des cinq espèces cibles sous six combinaisons de scénarios climatiques et de changements d'occupation des sols.

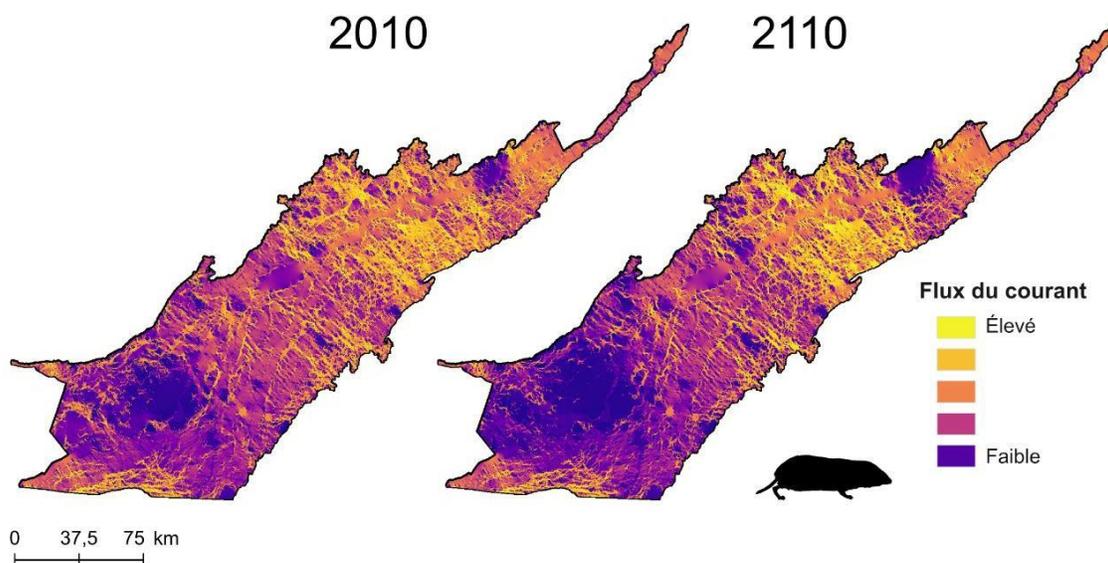


Figure 8. Exemple de carte de flux du courant pour la grande musaraigne au début de la simulation en 2010 (pour toutes les réalisations) et à la fin de la simulation en 2110 (résultats moyens pris sur toutes les réalisations) suivant le scénario le plus extrême (BAU_85).

4.3 Projection de la connectivité écologique pour les basses-terres du Saint-Laurent

Lors de l'évaluation de la connectivité du paysage à travers les années, nous nous sommes principalement concentrés sur les changements de flux du courant à travers la zone d'étude, et ce, à partir de 2010 (début de la simulation) et pour chacun des pas de temps suivants (2030, 2050, 2070, 2090, 2110). Des résultats additionnels relatifs aux analyses de connectivité sont aussi fournis en annexe sous forme de tableaux et de graphiques.

Les modèles indiquent que la connectivité écologique est susceptible de diminuer globalement de 1 à 6 % au cours du prochain siècle pour les basses-terres du Saint-Laurent (tableau 3). Cependant, les pertes en connectivité projetées ne sont pas réparties uniformément au sein de la zone d'étude et des gains en connectivité sont aussi attendus pour certaines zones.

Les pertes en connectivité sont associées à un déclin et à une fragmentation des habitats convenables, une conséquence directe de l'expansion urbaine et, dans une moindre mesure, de l'intensification agricole. Les gains en connectivité résultent quant à eux d'une combinaison de deux processus, selon le scénario considéré : 1) la réorientation des voies de connectivité vers les corridors fauniques restants à mesure que les habitats environnants sont perdus et 2) l'augmentation des habitats convenables du fait des changements dans la composition des forêts causés par les changements climatiques. De façon générale, dans tous les scénarios et itérations, les changements d'occupation des sols ont eu un impact plus important sur l'évolution de la connectivité du paysage à travers le temps que les changements climatiques

seuls. Par ailleurs, la combinaison des deux types de changements a généralement entraîné les pertes de connectivité les plus élevées (tableau 3).

Tableau 3. Évolution de la connectivité écologique moyenne de 2010 à 2110 pour chacune des deux régions naturelles (niv. 2) des basses-terres du Saint-Laurent, ainsi qu'à l'échelle de l'ensemble des basses-terres. Les données sont résumées pour six scénarios combinant des changements d'occupation des sols et des changements climatiques et pour cinq espèces cibles. Les valeurs sont exprimées en pourcentage moyen de variation de flux du courant du début à la fin de la période de simulation. La plus grande valeur absolue par espèce et référence écologique est indiquée en gras.

Unité du CERQ	Scénario	Grande musaraigne	Martre d'Amérique	Salamandre rayée	Grenouille des bois	Ours noir
Basses-terres du Saint-Laurent	NC_NC	-0,39	-1,58	-0,43	0	0
	NC_45	-1,23	-1,36	-1,05	0	0
	NC_85	-1,28	-1,06	-1,14	0	0
	BAU_NC	-5,02	-5,23	-4,71	-4,97	-4,33
	BAU_45	-5,74	-4,93	-5,25	-4,98	-4,33
	BAU_85	-5,8	-4,73	-5,31	-4,96	-4,31
Plaine du moyen Saint-Laurent	NC_NC	1,77	-0,02	0,82	0	0
	NC_45	0,91	-1,31	0,22	0	0
	NC_85	1,07	-5,03	0,36	0	0
	BAU_NC	1,44	-0,56	0,90	-0,75	-1,07
	BAU_45	0,67	-1,60	0,34	-0,74	-1,02
	BAU_85	0,82	-5,15	0,5	-0,72	-1,02
Plaine du haut Saint-Laurent	NC_NC	-2,42	-3,25	-1,65	0	0
	NC_45	-3,24	-1,42	-2,28	0	0
	NC_85	-3,5	3,21	-2,58	0	0
	BAU_NC	-11,09	-10,24	-10,12	-9,08	-8,21
	BAU_45	-11,75	-8,51	-10,65	-9,1	-8,27
	BAU_85	-12,03	-4,28	-10,93	-9,1	-8,22

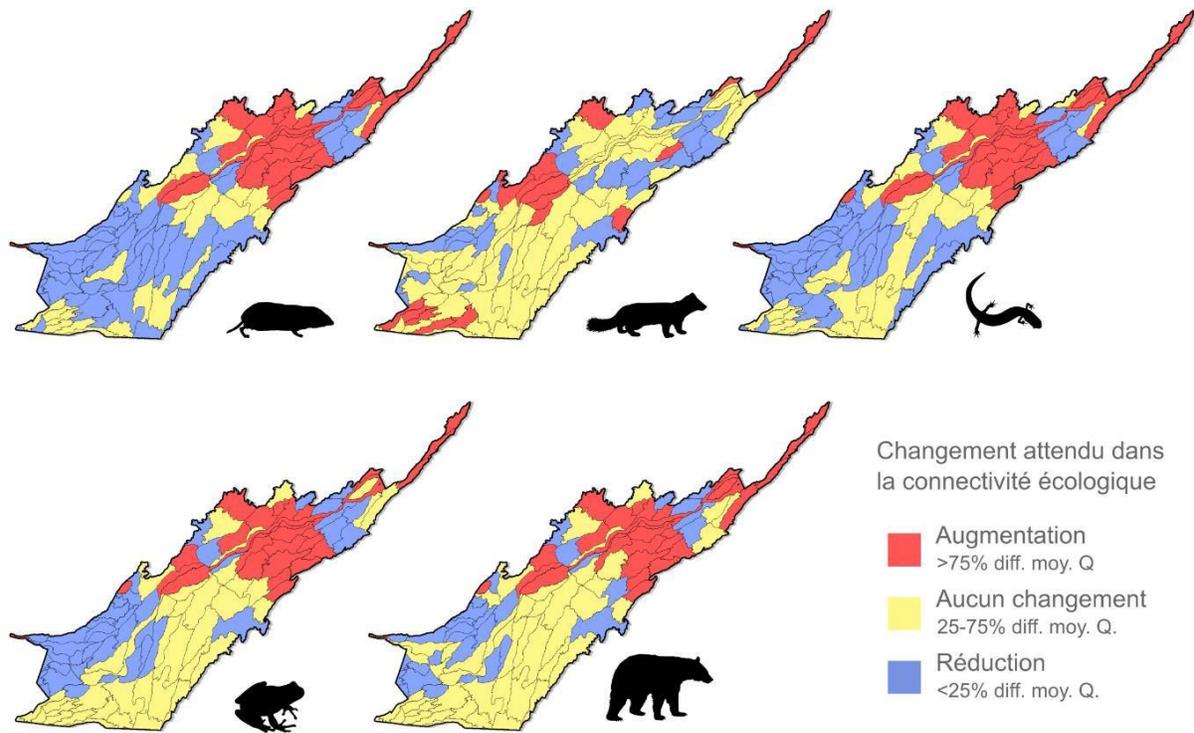


Figure 9. Changement attendu dans la connectivité écologique des basses-terres du Saint-Laurent selon le scénario le plus extrême (BAU_85) entre 2010 et 2110 pour chacune des espèces cibles. Le degré de changement anticipé est représenté selon trois classes : augmentation de la connectivité (>75 % de différence moyenne), aucun changement (25 à 75 % de différence moyenne) et réduction de la connectivité (<25 % de différence moyenne).

4.3.1 Tendances régionales

Les pertes en connectivité anticipées sont principalement concentrées dans la plaine du haut Saint-Laurent (tableau 3) et associées à l'expansion des centres urbains existants, incluant : la Communauté métropolitaine de Montréal, la Communauté métropolitaine de Québec, Trois-Rivières, Drummondville, Shawinigan et Victoriaville (classés selon les données du recensement contemporain). L'urbanisation s'étend de façon circulaire à partir des noyaux urbains, et entraîne la perte d'habitats, la fragmentation des corridors écologiques et le déclin de la connectivité (figure 8). Selon le scénario le plus extrême (BAU_85), les ensembles physiographiques (niv. 3, figure 2) les plus ciblés par des pertes en connectivité d'ici 2110, suivant les espèces considérées, incluent : la plaine de Saint-Benoît–Montréal (diminution de 11 à 23 %), la plaine de Joliette (de 10 à 20 %), les terrasses de Cap-Rouge–Beaupré (de 14 à 19 %), la plaine de Saint-Jean–Beauharnois (de 3 à 13 %) et la plaine de Verchères–Lanoraie–Lac Saint-Pierre (de 2 à 12 %).

Puisque la connectivité a tendance à diminuer autour des villes, les corridors fauniques restants prennent quant à eux de plus en plus d'importance (figure 9). Nos modèles n'ont cependant pas

été paramétrés de manière à prédire la potentielle reconnexion des parcelles d'habitat autour des centres urbains par le reboisement ou la régénération naturelle. L'augmentation relative de la connectivité résulte principalement de la réorientation de la dispersion des animaux dans notre analyse de réseau. Les voies de connectivité qui sont perdues en raison des changements d'occupation des sols sont redirigées vers des voies restantes.

L'un de ces corridors fauniques pour lesquels on anticipe une augmentation de l'importance relative d'ici 2110 s'étend entre Trois-Rivières et la Communauté métropolitaine de Québec (figures 8 et 9). La couverture forestière actuelle et la connectivité du paysage sont élevées, et peu de pertes d'habitats sont attendues pour cette zone étant donné sa faible densité de population. La dispersion animale va donc très probablement être réorientée vers ce corridor faunique à mesure que les villes s'étendent vers l'ouest (Trois-Rivières, Shawinigan, Drummondville et la Communauté métropolitaine de Montréal) et l'est (Communauté métropolitaine de Québec). Selon le scénario le plus extrême (BAU_85), les ensembles physiographiques (niv. 3, figure 2) à l'intérieur de ce corridor pour lesquels les gains en connectivité d'ici 2110 seront les plus importants, pour toutes les espèces cibles à l'exception de la martre, incluent : la terrasse de Saint-Raymond–Pont-Rouge (5 % d'augmentation pour la musaraigne et la salamandre), la plateforme de Lotbinière (3 % d'augmentation pour la musaraigne et la salamandre) et la plaine de Manseau–Saint-Gilles (2 % d'augmentation pour la musaraigne). À l'échelle des basses-terres, la terrasse de L'Islet est une autre région physiographique pour laquelle la valeur de connectivité relative devrait augmenter sous le scénario BAU_85, notamment en raison de la réorientation de la connectivité vers des régions nordiques de faible démographie dans nos simulations.

Pour certaines espèces (p. ex., la musaraigne et la salamandre), les changements climatiques devraient entraîner des gains de connectivité pour les ensembles physiographiques au nord des basses-terres du Saint-Laurent (tableau 3; figure 10), plus précisément ceux composant la plaine du moyen Saint-Laurent. La composition de la forêt devrait passer de résineuse à mixte et feuillue dans cette zone et augmenter en âge, favorisant des espèces particulières et ouvrant de nouvelles voies de connectivité (annexe, section 3 : résultats de connectivité supplémentaires).

Enfin, des niveaux intermédiaires de changements sont attendus pour les régions physiographiques situées dans des régions agricoles peu peuplées (p. ex., la plaine de Saint-Hyacinthe) actuellement à faible couvert forestier, car l'expansion urbaine est moins probable pour ces régions (figure 10). Peu de changements sont prévus pour le district écologique (niv. 4) correspondant à l'île de Montréal; l'île est déjà largement développée et parmi les forêts qui subsistent, peu sont menacées d'expansion urbaine dans nos modèles.

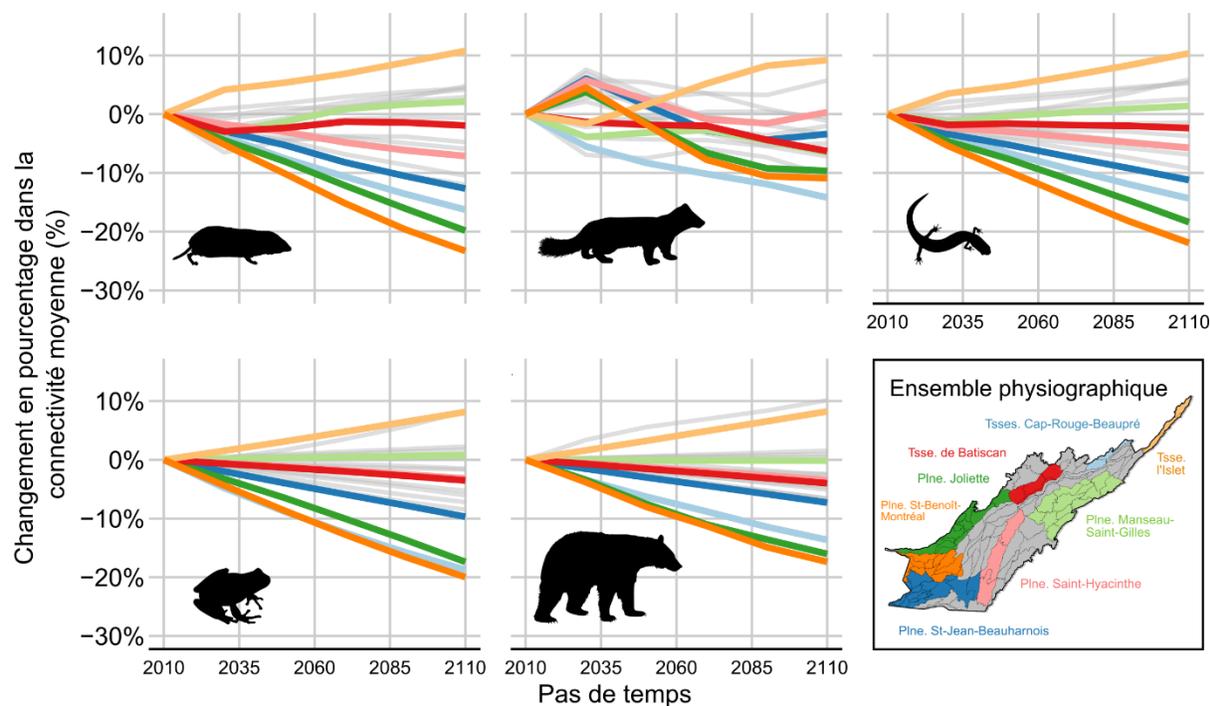


Figure 10. Pourcentage de changements attendus dans la connectivité moyenne selon le scénario le plus extrême (BAU_85) entre 2010 et 2110 pour chacune des espèces cibles. Les différences ont été calculées par rapport à la connectivité moyenne en 2010 et synthétisées dans les ensembles physiographiques (niv. 3).

4.3.2 Tendances par espèces cibles

Dans l'ensemble, les gains et les pertes en connectivité par ensemble physiographique (niv. 3) suivaient les mêmes tendances entre les espèces et les scénarios, à l'exception de la martre d'Amérique. Au niveau des districts écologiques (niv. 4), on a observé une certaine variation de la connectivité entre les espèces. Les tendances similaires de la connectivité écologique pour la musaraigne, la salamandre, la grenouille et l'ours sont probablement liées à la préférence commune de ces espèces pour les forêts de feuillus (gain causé par la conversion des résineux en feuillus sous l'effet des changements climatiques) et au fait que ces habitats forestiers disparaissent au cours du temps (perte causée par les changements d'occupation des sols). La martre d'Amérique, cependant, se distingue par sa préférence pour les forêts résineuses et montre une réponse unique à la répartition changeante de ce type de forêt en raison des changements climatiques. Cette réponse est aussi observée sous des scénarios sans changement d'affectation des terres, mais avec des niveaux de changements climatiques intermédiaires (NC_45) ou élevés (NC_85) (tableau 3; annexe, section 3).

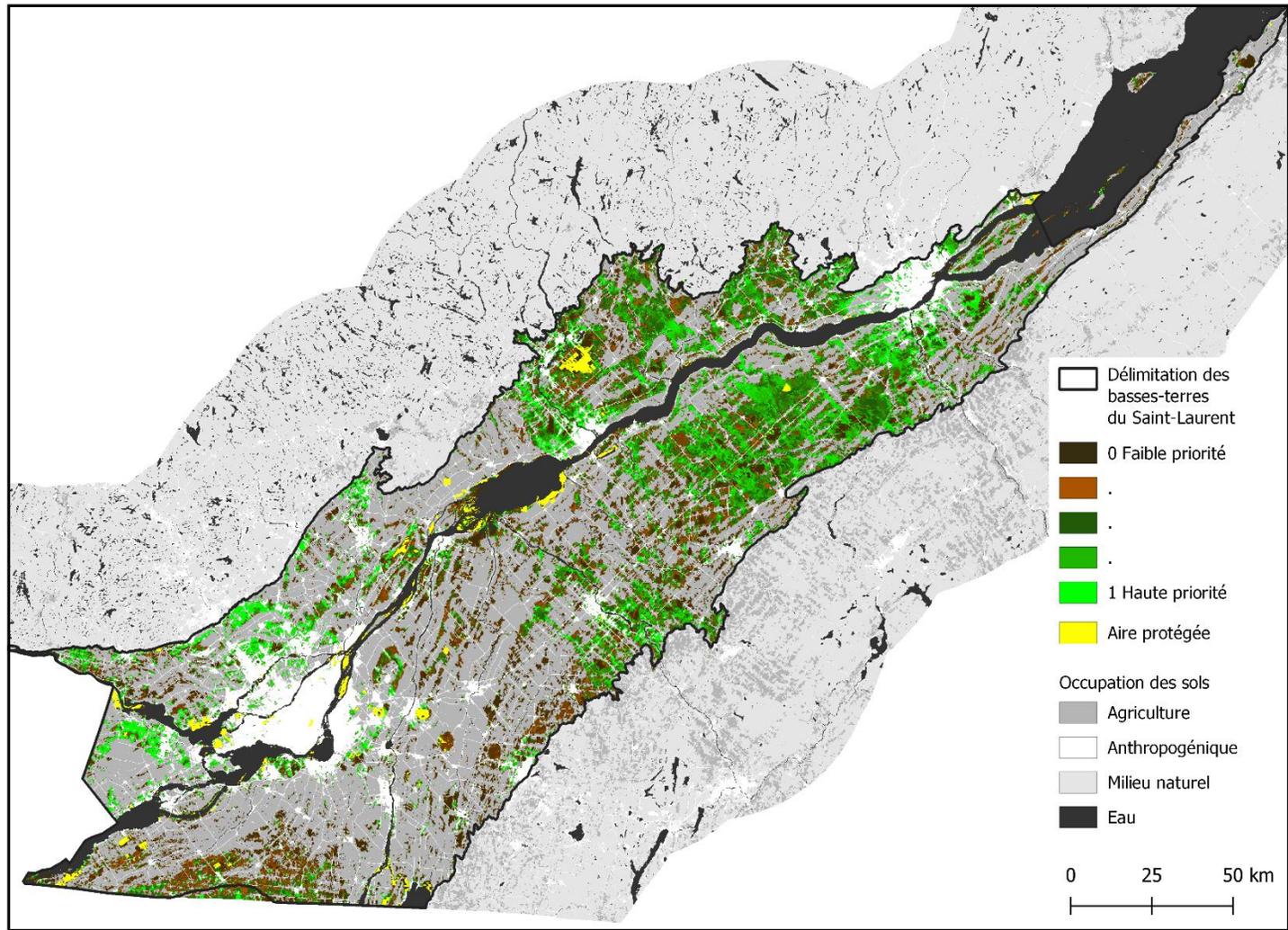


Figure 11. Priorités de conservation des milieux naturels des basses-terres du Saint-Laurent, en fonction de la qualité des parcelles d'habitat et des critères de connectivité issus de l'occupation actuelle des sols et de futurs scénarios climatiques et de changements d'occupation des sols, pour nos cinq espèces cibles. Les couleurs représentant les priorités ont été modifiées par interpolation linéaire.

4.4 Priorités de conservation

Nous avons utilisé des informations sur les changements anticipés dans la qualité et la connectivité des habitats pour mettre à jour les priorités de conservation pour la connectivité en fonction du paysage actuel. Les zones prioritaires sont situées dans des régions où les pertes projetées touchent des habitats de hautes qualité et connectivité sous le scénario le plus extrême, soit le maintien du statu quo pour les changements d'occupation des sols et des changements climatiques RCP 8.5 (BAU_85) [figure 11]. Les zones entourant la Communauté métropolitaine de Montréal, Trois-Rivières et la Communauté métropolitaine de Québec étaient à haut risque d'être urbanisées et ont reçu une priorité de conservation plus élevée. Les zones ont également été classées en priorité si l'on s'attendait à ce que leur qualité d'habitat ou leur valeur de connectivité augmente. Le corridor faunique situé dans le grand complexe de forêts et de milieux humides entre Trois-Rivières et la ville de Québec est d'ailleurs devenu hautement prioritaire, puisqu'on anticipe une augmentation de sa valeur en matière de connectivité avec la perte d'autres corridors du fait des changements d'occupation des sols (figure 11).

Nous avons comparé la distribution des zones hautement prioritaires (17 %, selon l'objectif 11 d'Aichi) pour la conservation de la connectivité entre les analyses basées uniquement sur les conditions actuelles du paysage (phase II) et celles basées sur les conditions projetées (phase actuelle) [figure 12]. Dans l'analyse basée sur les conditions actuelles du paysage, on constate que les zones prioritaires étaient réparties plus uniformément au sein des basses-terres. Ces priorités étaient davantage concentrées sur les zones avec une forte probabilité d'urbanisation et où on s'attendait à une augmentation de la connectivité dans l'analyse basée sur les conditions futures du paysage. Ces deux priorisations sont des outils de planification complémentaires qui peuvent être utilisés pour orienter les décisions d'aménagement du territoire. L'évaluation des priorités de conservation pour la connectivité basée uniquement sur les données actuelles du paysage permet des analyses plus détaillées, incluant des analyses de connectivité à plusieurs échelles et avec des données d'occupation des sols à une résolution plus fine. L'évaluation des priorités de conservation pour la connectivité qui intègre des projections des changements du paysage fournit par ailleurs des informations inestimables sur la vulnérabilité et la valeur future des habitats, mais les limites de calcul nécessitent toutefois des analyses de connectivité simplifiées à des résolutions plus grossières.

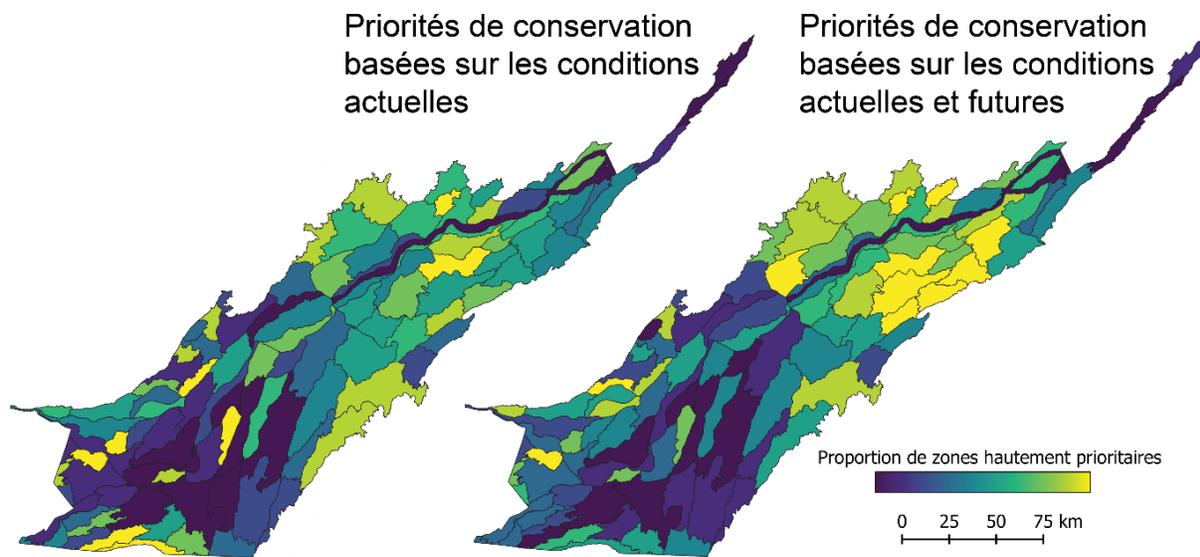


Figure 12. Proportion des zones hautement prioritaires (17 %) dans chaque district écologique sur la base d'une hiérarchisation des priorités de conservation utilisant des informations détaillées sur l'occupation actuelle des sols et le climat (à gauche), et d'une hiérarchisation des priorités de conservation qui intègre à la fois de l'occupation des sols actuelle et projetée et des scénarios climatiques (à droite).

5 Conclusions et recommandations

Nous avons développé un modèle intégré visant à prévoir la connectivité écologique sous différents scénarios climatiques et de changements d'occupation des sols. Ce modèle combine des simulations d'occupation des sols et de changements forestiers, des projections climatiques régionales, des analyses de connectivité des habitats multispèces et une priorisation de la conservation. Nous avons appliqué le modèle à l'échelle des basses-terres du Saint-Laurent (30 000 km²) pour prévoir la connectivité écologique après 100 ans suivant un maintien des tendances historiques relativement à l'occupation des sols (statu quo) et différents scénarios climatiques. Ces scénarios ont été sélectionnés afin de servir de référence à des fins de comparaison avec d'autres scénarios de gestion des sols.

Les résultats de ces scénarios de référence fournissent des informations importantes sur les effets de l'occupation des sols et des changements climatiques sur la connectivité écologique. Premièrement, le principal facteur de perte et de fragmentation des habitats sous un scénario statu quo était l'urbanisation, avec des pertes projetées de 16 % pour les forêts et de 8 % pour les milieux humides entre 2010 et 2110. Les petits fragments de forêts proches des zones urbaines étaient les plus susceptibles d'être développés. Deuxièmement, la connectivité écologique a globalement diminué dans les basses-terres du Saint-Laurent sous le scénario de changements dans le paysage le plus extrême, soit un maintien des tendances historiques en matière d'occupation des sols et un scénario climatique RCP 8.5. L'étendue des pertes en connectivité variait entre 1 % et 12 % selon les espèces cibles et le district écologique. Les pertes en connectivité étaient principalement associées à une réduction de la superficie des habitats convenables causée par l'expansion urbaine et les changements climatiques. Quatre des espèces cibles – la grande musaraigne, la salamandre rayée, la grenouille des bois et l'ours noir – ont été plus négativement affectées par les changements d'occupation des sols que par les changements climatiques lors des simulations. La conservation à long terme de ces espèces et de la biodiversité qu'elles représentent nécessitera une réduction des taux de conversion des terres et une concentration sur la restauration des habitats afin de compenser la perte continue observée aujourd'hui. Pour la cinquième espèce cible – la martre d'Amérique –, les changements climatiques ont causé des pertes et une fragmentation des habitats plus importantes que les changements d'occupation des sols au cours de la période simulée. Cette réponse de la martre d'Amérique est caractéristique de la réponse d'autres espèces dont les niches écologiques sont menacées par les changements climatiques. Troisièmement, l'intégration de scénarios climatiques et de changements d'occupation des sols dans la priorisation de la conservation a fortement modifié les zones prioritaires. Une priorité plus élevée a été attribuée aux zones naturelles présentant un risque élevé de perte en raison des changements de l'occupation des sols ou climatiques, telles que celles situées à proximité des centres urbains. La priorité a également été accordée aux zones où la qualité de l'habitat et l'importance de la connectivité devraient augmenter en raison des changements dans le paysage et le climat, comme le corridor faunique situé dans le grand complexe de forêts et de milieux humides entre Trois-Rivières et la ville de Québec.

Notre modèle pour la prévision de la connectivité écologique fournit un modèle de base auquel nous pouvons ajouter des détails supplémentaires au niveau des sous-modèles, tels que des améliorations dans les modèles d'occupation des sols et climatiques ou des ajouts de facteurs environnementaux dans les modèles de qualité des habitats des espèces. L'ajout de classes d'intensité agricole et urbaine au modèle d'occupation des sols pourrait aussi mieux représenter les effets potentiels de ces classes d'occupation des sols sur les habitats des espèces et leur connectivité. Certaines espèces cibles sont plus sensibles à l'intensification agricole ou sont capables d'utiliser les terres en jachère pour certains de leurs besoins en matière d'habitat. Il peut également y avoir des compromis quant à la connectivité écologique entre une urbanisation plus intense (densité plus élevée) sur une étendue spatiale restreinte et une urbanisation de faible intensité sur une zone plus vaste. Le zonage est un autre paramètre qui peut être ajouté au modèle de simulation des changements d'occupation des sols et permettrait de restreindre davantage le modèle de développement en fonction des restrictions actuelles ou futures.

Les résultats soulignent l'importance de coordonner le développement urbain et les efforts de conservation du paysage dans toute l'étendue des basses-terres du Saint-Laurent, car la perte d'espace naturel dans un secteur se répercute à l'échelle de la connectivité régionale. Les plans de développement urbain et les cibles de conservation fixées à l'échelle des régions métropolitaines (p. ex., le Plan métropolitain d'aménagement et de développement [PMAD] de Québec, le PMAD de Montréal) ne reflètent pas nécessairement les besoins en connectivité des espèces susceptibles de se disperser à travers les basses-terres à court ou à long terme. Nous avons montré que la perte d'habitats dans la région métropolitaine de Montréal est susceptible d'augmenter l'importance relative des corridors fauniques restants, notamment ceux passant entre Trois-Rivières et Québec, avec peu d'autres canaux migratoires encore disponibles à la fin de la période de 100 ans. Les plans de conservation à l'échelle régionale, tels que celui conçu par Jobin et al. (2019), contribuent à sécuriser la représentativité des habitats critiques pour la biodiversité à de larges échelles spatiales. Nos méthodes peuvent être utilisées pour tester l'efficacité des efforts de planification de la conservation à grande échelle face aux moteurs mondiaux de changements environnementaux, qu'il s'agisse des changements de l'occupation des sols ou des changements climatiques.

La prochaine étape consiste à animer des ateliers avec les parties prenantes afin d'élaborer d'autres scénarios d'occupation des sols pour les basses-terres du Saint-Laurent. Des scénarios pourraient être élaborés pour refléter les connaissances des parties prenantes sur le paysage ainsi que leurs priorités. Ces analyses de scénarios supplémentaires nous permettront de raffiner les priorités de conservation, à la lumière de la connectivité écologique future. Cela contribuera aussi à l'atteinte de notre objectif de créer un réseau d'habitats multiespèces pour les basses-terres du Saint-Laurent qui soit robuste aux changements climatiques et d'occupation des sols.

Références

- Agriculture et Agroalimentaire Canada . 2015. Land Use 1990, 2000 and 2010 (LU1990, LU2000, LU2010). Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ontario. 13 p.
- Albert, C.H., Rayfield, B., Dumitru, M., Gonzalez, A. 2017. Applying network theory to prioritize multispecies habitat networks that are robust to climate and land-use change. *Conservation Biology*, 31:1383-1396.
- Anantharaman, R., Hall, K., Shah, V.B., Edelman, A. 2020. Circuitscape in Julia: High Performance Connectivity Modelling to Support Conservation Decisions. *JuliaCon Proceedings*, 1(1), 58, <https://doi.org/10.21105/jcon.00058>.
- Boulanger, Y., Arseneault, D., Boucher, Y., Gauthier, S., Cyr, D., Taylor, A.R., Price, D.T., Dupuis, S. 2019. Climate change will affect the ability of forest management to reduce gaps between current and presettlement forest composition in southeastern Canada. *Landscape ecology*, 34:159-174.
- Boulanger, Y., Taylor, A.R., Price, D.T., Cyr, D., Sainte-Marie, G. 2018. Stand-level drivers most important in determining boreal forest response to climate change. *Journal of Ecology*, 106:977-990.
- Boulanger, Y., Taylor, A.R., Price, D.T., Cyr, D., McGarrigle, E., Rammer, W., Sainte-Marie, G., Beaudoin, A., Guindon, L., Mansuy, N. 2017. Climate change impacts on forest landscapes along the Canadian southern boreal forest transition zone. *Landscape ecology*, 32(7):1415-1431.
- Direction de l'expertise en biodiversité. 2018. Guide d'utilisation du Cadre écologique de référence du Québec (CERQ), version de diffusion 2018. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec. 24 p.
- Jobin, B., Gratton, L., Côté, M.J., Pfister, O., Lachance, D., Mingelbier, M., et al. 2019. Atlas des territoires d'intérêt pour la conservation dans les Basses-terres du Saint-Laurent – Rapport méthodologique version 2, incluant la région de l'Outaouais. Environnement et Changement climatique Canada, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Plan d'action Saint-Laurent, Québec (Québec). 170 p.
- McRae, B. H., Dickson, B. G., Keitt, T. H., Shah, V. B. 2008. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 89:2712-2724.
- McRae, B. H., Shah, V. B. 2009. Circuitscape user's guide. University of California.

- Meurant, M., Gonzalez, A., Doxa, A., Albert, C.H. 2018. Selecting surrogate species for connectivity conservation. *Biological Conservation*, 227:326-334.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. 2019. Base de données géographiques et administratives à l'échelle de 1/1 000 000. Municipalités régionales de comté (MRC) et territoires équivalents, circa 2017. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec (Québec).
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. 2018. AQRéseau : Données officielles sur la localisation des routes (couverture de lignes). Disponible en ligne : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/adresses-quebec>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 2018. Registre des aires protégées. Disponible en ligne : http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protegees/registre/
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. 2011. Norme de cartographie écoforestière – Troisième inventaire écoforestier. Québec. 92 p.
- Moilanen, A. 2008. Generalized complementarity and mapping of the concepts of systematic conservation planning. *Conservation Biology*, 22:1655–1658.
- Moilanen, A., Leathwick, J.R., Quinn, J.M. 2011. Spatial prioritization of conservation management. *Conservation Letters*, 4:383–393.
- Moilanen, A., Pouzols, F.M., Meller, L., Veach, V., Arponen, A., Leppänen, J., Kujala, H. 2014. Spatial conservation planning methods and software zonation. User Manual. Version 4. Disponible en ligne : <https://www2.helsinki.fi/en/researchgroups/digital-geography-lab/software-developed-in-cbig>. Accédé le 6 mai 2019.
- Rayfield, B., Dumitru, M., Pelletier, D., Laroque, G., Albert, C., Daniel, C.J., Gonzalez, A. 2018. Une évaluation de la connectivité écologique pour les Basses-terres du Saint-Laurent. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, gouvernement du Québec, Québec.
- Rayfield, B., Larocque, G., Daniel, C., Gonzalez, A. 2019. Une priorisation pour la conservation des milieux naturels des Basses-terres du Saint-Laurent en fonction de leur importance pour la connectivité. Centre de la science de la biodiversité du Québec, Montréal (Québec). 36 p.