

# RAPPORT FINAL

## PORTRAIT DE LA CONTRIBUTION ACTUELLE ET FUTURE DES MILIEUX NATURELS DE LA MRC NICOLET- YAMASKA SELON TROIS SCÉNARIOS D'AMÉNAGEMENT

**habitat**  
LA NATURE À L'ŒUVRE



MARS

2023

## HABITAT

---

Habitat est une entreprise de solutions environnementales fondée en 2017 (d'abord connue sous le nom d'Eco2urb) et basée à Montréal. Elle propose des solutions fondées sur la nature pour alimenter et propulser la transition écologique de ses client·e·s, notamment dans un contexte de relance verte.

Habitat est née d'une mise en commun des expertises de trois laboratoires de pointe dans le domaine des sciences humaines et naturelles. À la tête de l'entreprise, on retrouve les professeurs Dupras, Gonzalez et Messier, tous reconnus à l'échelle internationale dans leurs domaines.

Au cours des quatre dernières années, Habitat a catalysé la transition écologique d'une clientèle diversifiée. L'équipe collabore avec de nombreuses universités, centres de recherche et organisations non gouvernementales afin de faciliter la mise en œuvre de travaux scientifiques reliés à l'écologie, la foresterie et l'aménagement du territoire. Elle propose des approches innovatrices et des stratégies environnementales à la fine pointe de la science.

L'équipe de consultants scientifiques d'Habitat vous encadre dans la gestion durable des écosystèmes, dans la conservation de la biodiversité et dans la prise en compte des services rendus par vos infrastructures naturelles, en appliquant la meilleure science disponible.

Notre mission est d'accélérer votre transition écologique à l'aide de solutions ancrées dans la nature et la science.

## Équipe de réalisation

**Analyses & rédaction :** Noémie Lacroix, M. Sc.  
Kyle T. Martins, M. Sc.  
Olivier Tanguy, M. Sc.  
Tejasvi Hora, Ph. D.

**Coordination :** Olivier Tanguy, M. Sc.

**Direction scientifique :** Fanny Maure, Ph. D.  
Sylvia Wood, Ph. D.

## Citation suggérée :

Habitat. 2023. Portrait de la contribution actuelle et future des milieux naturels de la MRC Nicolet-Yamaska selon trois scénarios d'aménagement. Pour la MRC Nicolet-Yamaska. 61p.

## SOMMAIRE EXÉCUTIF

---

La MRC Nicolet-Yamaska fait figure de pionnière au Québec en matière d'inclusion des enjeux environnementaux dans sa vision et sa stratégie de développement pour le territoire. Consciente de la nécessité d'une transition écologique en matière de gestion de nos écosystèmes, la MRC a mandaté Habitat pour être mieux informée et outillée sur la contribution actuelle de son patrimoine naturel et ainsi mieux concilier la protection des écosystèmes naturels, le développement et les activités économiques qui s'y déroulent. La présente étude fournit un premier portrait écologique du rôle et des bénéfices actuellement rendus par les milieux naturels de la MRC. Cette contribution a été évaluée à travers l'approvisionnement en cinq services écosystémiques clés (exportation des sédiments, du phosphore et de l'azote vers les cours d'eau, pollinisation, recharge hydrique des nappes souterraines, ruissellement de surface et stockage du carbone), le rôle des milieux naturels dans le réseau de connectivité écologique du paysage et leur niveau de résilience face aux changements globaux. Finalement, pour avoir une meilleure compréhension des impacts de l'aménagement sur la santé des écosystèmes et la biodiversité, trois scénarios contrastés d'aménagement du territoire ont été modélisés : un scénario *Statu quo*, en continuité des tendances historiques d'urbanisation, un scénario *Compensation*, avec pour objectif la restauration des milieux en friche, et un scénario *Renaturalisation*, où une partie des milieux agricoles sont converties en milieux forestiers pour atteindre 45 % de milieux naturels sur le territoire. Ces trois stratégies d'aménagement ont été comparées en termes d'approvisionnement en services et de protection de la biodiversité. Plusieurs résultats saillants découlent de cette étude :

- L'évaluation de la valeur des milieux naturels renseigne sur le rôle de chaque type de milieu au sein du territoire et permet d'identifier ceux qui jouent le plus grand rôle, pour un ou plusieurs services. Cet exercice permet également de mieux visualiser les mesures d'atténuation et/ou de restauration à mettre en place afin d'améliorer la santé des écosystèmes.
- Les stocks de carbone des milieux naturels de la MRC sont notables, en partie dû à la présence de vastes milieux humides. Au total, les milieux naturels du territoire renferment plus d'un milliard de tonnes de carbone, ce qui représente 244 milliards de dollars.
- Le territoire de la MRC est parcouru de nombreux corridors facilitant le déplacement des espèces fauniques entre leurs parcelles d'habitat et il contribue activement au réseau de connectivité à l'échelle régionale. Certains milieux naturels, notamment le long des rivières Nicolet Sud-Ouest et Nicolet, constituent des points névralgiques de ce réseau et sont à conserver en priorité pour assurer le maintien de la biodiversité.
- La majorité des milieux boisés du territoire sont peu diversifiés et ils sont fortement vulnérables à la sécheresse, un aléa climatique qui risque de s'amplifier dans les prochaines décennies. Des interventions de diversification sont à prévoir en priorité dans les secteurs les plus vulnérables, dans l'optique de les rendre plus résilients aux changements globaux et de maintenir les bénéfices offerts par ces écosystèmes.
- Limiter la conversion des milieux naturels en milieux anthropiques constitue la mesure la plus importante pour stopper l'érosion de la biodiversité et assurer le maintien en services dont la société est désormais largement dépendante. De plus, seule une combinaison de mesures, telles que la restauration des friches et le reboisement d'une part des espaces agricoles de la MRC, permettra d'augmenter les bénéfices écologiques selon les scénarios testés.

Pour faire face aux enjeux environnementaux du territoire, notamment associés aux changements globaux, il est recommandé d'adopter des mesures combinant la protection, la restauration et l'aménagement durable des milieux naturels (désormais connues sous le terme « Solutions nature »). Les milieux naturels jouent un rôle essentiel de fournisseurs de biens et services et nous nous devons d'assurer le maintien de cet approvisionnement en adaptant nos pratiques de gestion du patrimoine naturel.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION</b>	<b>7</b>
<b>1. PORTRAIT ÉCOLOGIQUE ACTUEL DU TERRITOIRE</b>	<b>8</b>
<b>1.1 Services écosystémiques actuels</b>	<b>9</b>
1.1.1. Contrôle de l'érosion	10
1.1.2. Contrôle des polluants vers les milieux aquatiques	13
1.1.3. Recharge des nappes souterraines et atténuation du ruissellement de surface	17
1.1.4. Contribution à la pollinisation	20
1.1.5. Stockage du carbone par les milieux naturels	23
<b>1.2 Connectivité écologique au sein du territoire</b>	<b>27</b>
<b>1.3 Vulnérabilités des milieux boisés du territoire</b>	<b>30</b>
1.3.1. Diversité fonctionnelle des milieux boisés	30
1.3.2. Vulnérabilités biologiques et climatiques	33
1.3.3. Urbanisation et intensification agricole	37
<b>2. QUELS MILIEUX NATURELS CONSERVER EN PRIORITÉ ? L'APPROCHE MULTICRITÈRE COMME SOLUTION OPTIMALE</b>	<b>40</b>
<b>3. RÉFLÉCHIR AUJOURD'HUI POUR L'AMÉNAGEMENT TERRITORIAL DE DEMAIN</b>	<b>43</b>
<b>3.1 Trois stratégies d'aménagement du territoire</b>	<b>43</b>
<b>3.2 Comparaison des portraits écologiques présent et futurs</b>	<b>46</b>
3.2.1. Bilan du scénario 1, Statu quo	48
3.2.2. Bilan du scénario 2, Compensation	49
3.2.3. Bilan du scénario 3, Renaturalisation	50
<b>CONCLUSION</b>	<b>51</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>52</b>
<b>ANNEXE</b>	<b>57</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b> Cartographie des types d'occupation des sols du territoire de la MRC.	8
<b>Figure 2.</b> Proportion occupée par chaque type de milieu à l'échelle de la MRC	9
<b>Figure 3.</b> Exportation annuelle des sédiments vers les lacs et rivières du territoire de la MRC.	11
<b>Figure 4.</b> Exportation annuelle d'azote vers les lacs et les rivières du territoire de la MRC.	14
<b>Figure 5.</b> Exportation annuelle de phosphore vers les lacs et les rivières du territoire de la MRC.	15
<b>Figure 6.</b> Contribution des types d'occupation des sols à la recharge hydrique des nappes souterraines sur le territoire de la MRC.	18
<b>Figure 7.</b> Contribution des types d'occupation des sols au ruissellement de surface sur le territoire de la MRC.	19
<b>Figure 8.</b> Abondance relative des pollinisateurs sauvages en milieu agricole sur le territoire de la MRC.	21
<b>Figure 9.</b> Dépendance des milieux agricoles à la pollinisation sur le territoire de la MRC.	22

<b>Figure 10.</b> Quantité de carbone stocké dans la biomasse (A) et dans les sols (B) des milieux naturels de la MRC.	24
<b>Figure 11.</b> Synthèse de l'analyse de la connectivité omnidirectionnelle via les milieux naturels du territoire de la MRC, pour les cinq espèces fauniques sélectionnées.	28
<b>Figure 12.</b> Synthèse de l'analyse de connectivité nœud à nœud identifiant les corridors de déplacement du territoire pour les cinq espèces fauniques sélectionnées.	29
<b>Figure 13.</b> Indice de diversité fonctionnelle des milieux boisés de la MRC.	31
<b>Figure 14.</b> Vulnérabilité des milieux boisés de la MRC face aux cinq menaces biologiques jugées les plus préoccupantes pour la région.	35
<b>Figure 15.</b> Vulnérabilité des milieux boisés de la MRC face aux cinq menaces climatiques jugées les plus préoccupantes pour la région.	36
<b>Figure 16.</b> Indice de susceptibilité des milieux naturels aux pressions anthropiques et à l'intensification agricole sur le territoire de la MRC.	38
<b>Figure 17.</b> Indice de susceptibilité des milieux naturels aux pressions anthropiques et à l'intensification agricole pour la municipalité de Nicolet.	39
<b>Figure 18.</b> Priorisation multicritère des milieux naturels de la MRC, selon leur contribution en services écosystémiques et à la connectivité écologique du territoire et leur niveau de vulnérabilité.	42
<b>Figure 19.</b> Comparaison des superficies et proportions des différents types d'occupation des sols pour chacun des scénarios de développement de la MRC ainsi que pour l'état actuel du territoire.	45

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.</b> Coût de traitement des sédiments selon les catégories d'usage pour les catégories applicables au territoire de la MRC Nicolet-Yamaska.	12
<b>Tableau 2.</b> Quantité de carbone stocké par les milieux naturels du territoire de la MRC Nicolet-Yamaska et valeur économique associée.	25
<b>Tableau 3.</b> Répartition des espèces composant les milieux boisés de la MRC au sein des 6 groupes fonctionnels et exemple d'espèces issues de chacun des groupes.	32
<b>Tableau 4.</b> Description des 5 menaces biologiques retenues pour l'analyse de vulnérabilité et des dommages potentiels.	34
<b>Tableau 5.</b> Description des critères intégrés à l'analyse de priorisation multicritère afin de hiérarchiser les milieux naturels à conserver en priorité, et de leur poids respectif dans l'analyse.	40
<b>Tableau 6.</b> Comparaison de la contribution en services écosystémiques pour chacun des trois scénarios d'aménagement par rapport au portrait actuel du territoire de la MRC.	47
<b>Tableau 7.</b> Comparaison des indicateurs de connectivité pour les différents scénarios d'aménagement par rapport au portrait actuel du territoire.	48

## GLOSSAIRE

---

**Connectivité nœud à nœud** : indicateur de connectivité utilisé pour identifier les corridors de déplacement les plus probables entre différents « nœuds » spécifiques du territoire. Les « nœuds » sont des lieux choisis par l'utilisateur du fait de leur valeur écologique (p. ex. écosystèmes exceptionnels, nombreuses occurrences d'espèces à statut, sites d'intérêt pour la conservation identifiée).

**Connectivité omnidirectionnelle** : Évaluation de la connectivité du paysage dans toutes les directions au contraire de l'analyse nœud à nœud qui renseigne sur les corridors de déplacement les plus probables entre différents nœuds spécifiques du territoire pour chacune des espèces étudiées. L'analyse de connectivité omnidirectionnelle est souvent utilisée pour évaluer la connectivité à longue distance tandis que l'analyse nœud à nœud permet d'identifier les obstacles au déplacement des espèces entre différents nœuds et donc, des opportunités pour la restauration afin de renforcer la connectivité et le réseau de déplacement des espèces.

**Diversité fonctionnelle** : diversité au niveau des traits fonctionnels (voir définition plus bas) des espèces d'arbres recensées sur un territoire donné. On estime que la diversité fonctionnelle est une meilleure estimation de la diversité nécessaire au fonctionnement d'un écosystème que la diversité spécifique.

**Résilience** : capacité d'un milieu naturel à se remettre après une perturbation, de façon à maintenir les fonctions écologiques qu'il fournissait à son état initial.

**Traits fonctionnels** : caractéristiques biologiques des espèces animales et végétales qui dictent leurs réponses à différentes conditions environnementales. À titre d'exemple, la taille de semences et la tolérance à la sécheresse représentent des traits fonctionnels pour les arbres.

## INTRODUCTION

---

La MRC Nicolet-Yamaska s'est dotée en 2019 d'un plan de transition écologique afin de guider l'aménagement durable de son territoire. Ce document, le premier du genre au Québec, se focalise sur 5 grands enjeux, soit la gestion de l'eau, des matières résiduelles, la biodiversité et les milieux naturels, les changements climatiques et l'aménagement du territoire auxquels sont associés des objectifs et actions pour y répondre. La firme Habitat intervient à titre d'expert en gestion des milieux naturels pour accompagner la MRC à répondre aux enjeux d'aujourd'hui et de demain.

Le mandat d'Habitat aborde 4 des 5 grands enjeux identifiés par la MRC, soit la gestion de l'eau, la biodiversité et les milieux naturels, les changements climatiques et l'aménagement du territoire.

Un ensemble d'analyses a été mené afin de dresser le portrait écologique actuel du territoire, rendre compte des bénéfices offerts par les milieux naturels à la société et les vulnérabilités auxquelles ceux-ci sont exposés dans le contexte particulier des changements climatiques. Les bénéfices étudiés, communément appelés services écosystémiques, sont au nombre de 5. Il s'agit de la capacité des milieux naturels à (1) limiter l'érosion (2) réduire le transfert des nutriments (azote et phosphore) vers les cours d'eau (3) estimer le rôle des écosystèmes pour l'approvisionnement et la régulation de l'eau des cours d'eau et des nappes souterraines (4) évaluer l'abondance des pollinisateurs sauvages et le besoin de pollinisation des milieux agricoles et (5) quantifier les stocks de carbone dans la biomasse (aérienne et souterraine) des différents milieux naturels et du sol. Deux analyses de connectivité ont également été réalisées pour déterminer les principaux corridors écologiques régionaux et l'importance de chaque milieu naturel en tant que lieu d'habitat pour la faune. En complément, la vulnérabilité des milieux naturels, en particulier les milieux forestiers, a été étudiée pour une vaste gamme de perturbations climatiques et biologiques afin de juger les sites les plus vulnérables et proposer des actions pour augmenter leur [résilience](#) selon le concept de [diversité fonctionnelle](#).

## 1. PORTRAIT ÉCOLOGIQUE ACTUEL DU TERRITOIRE

La MRC Nicolet-Yamaska se situe au cœur des Basses-Terres du Saint-Laurent (BTSL), au sud du Lac Saint-Pierre. Le territoire est composé en majorité de milieux naturels (forêts, arbustaies, milieux humides) ou semi-naturels (milieux agricoles) (figure 1).

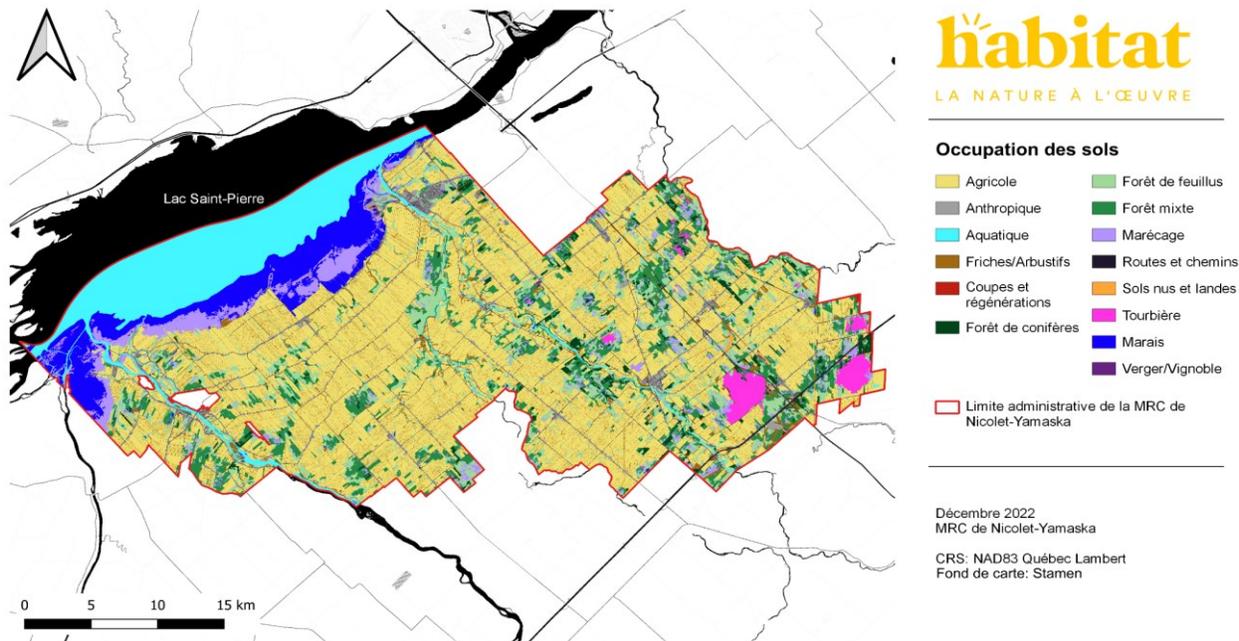
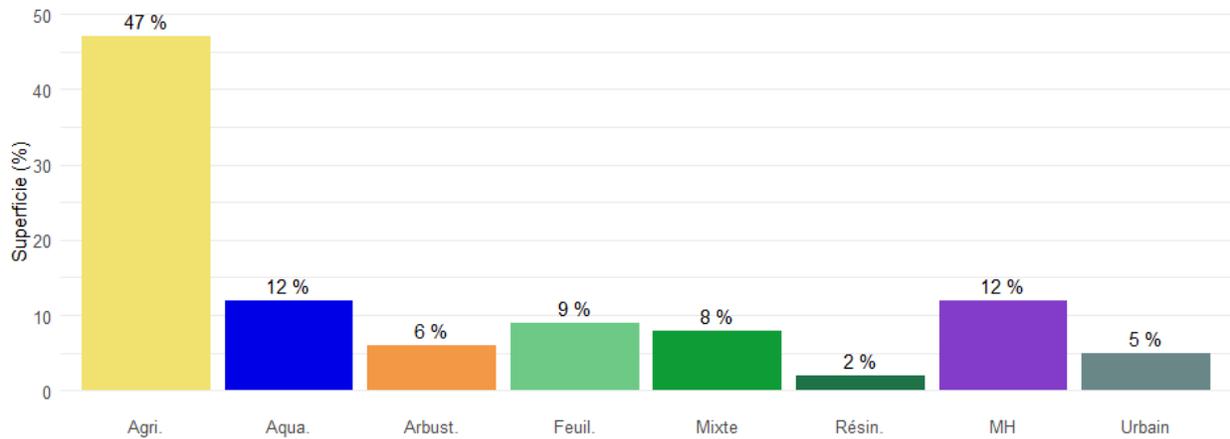


Figure 1. Cartographie des types d'occupation des sols du territoire de la MRC de Nicolet-Yamaska.

Les superficies agricoles représentent près de la moitié du territoire (47 %) et ce sont les cultures de maïs et de soya qui dominent (figure 2). Les paysages très agricoles du territoire tiennent à ses caractéristiques naturelles, un des sols les plus fertiles du Québec, un climat adéquat et une topographie largement plane. Le territoire est ensuite constitué de milieux boisés (19 %) disséminés sur l'ensemble du territoire dont 9 % sont des forêts feuillues, 8 % des forêts mixtes et 2 % des forêts de conifères. Viennent ensuite les milieux humides (12 %) et aquatiques (12 %) dont fait partie la réserve mondiale du Lac Saint-Pierre. Cette aire protégée est un haut lieu pour la conservation puisqu'elle abrite une diversité floristique et faunique remarquable et est une halte migratoire essentielle pour une multitude d'espèces aviaires, dont l'oie des neiges. Les milieux en friches, également appelés arbustaies, s'étalent pour leur part sur 6 % du territoire. Les milieux urbains, routes incluses, complètent le portrait avec des superficies estimées à 5 % du territoire total.



**Figure 2.** Proportion occupée par chaque type de milieu à l'échelle de la MRC

### 1.1 Services écosystémiques actuels

Les services écosystémiques font référence aux bénéfices fournis par le fonctionnement des écosystèmes (Costanza et al. 1997). Les différents milieux naturels d'un territoire (ex. forêts, milieux humides, arbustives) contribuent ainsi par exemple à la régulation du climat en capturant les gaz à effet de serre via le processus de photosynthèse des plantes, ils limitent également l'érosion éolienne et hydrique tout comme la pollution des lacs et rivières et offrent des habitats pour la faune et la flore.

Les sections suivantes présentent la contribution actuelle en services fournis par les milieux naturels du territoire de la MRC Nicolet-Yamaska, en se basant sur les 5 services écosystémiques retenus dans le cadre de cette étude, soit le contrôle de l'érosion et des polluants (azote et phosphore), la recharge des nappes souterraines et l'atténuation du ruissellement de surface bilan hydrique, la contribution à la pollinisation et le stockage de carbone.

Les diverses analyses réalisées reposent sur l'utilisation de données publiques, obtenues auprès des acteurs du territoire, et sur un ensemble d'outils d'analyses géomatiques et/ou de logiciels de modélisation (voir annexe pour les détails méthodologiques). La modélisation de chacun des services écosystémiques produit des valeurs biophysiques (ex. quantité de carbone stocké par les végétaux, quantité de sédiments ou de polluants chimiques exportés vers les rivières). Lorsque cela est possible, ces valeurs biophysiques sont converties en valeurs monétaires (voir Somda & Awaiss (2013) pour les méthodes d'évaluation économique des services écosystémiques) afin de faciliter leur compréhension par les aménagistes et mieux saisir la contribution des milieux naturels à notre bien-être et l'importance de les conserver. Toutefois, puisque l'évaluation et la valorisation des services écosystémiques rendus par les milieux naturels peut prendre plusieurs formes, il demeure complexe de rendre compte de l'ensemble des services rendus par un territoire et les chiffrer, notamment quand les milieux naturels ont une valeur

d'existence ou relationnelle<sup>1</sup>. Il existe en outre plusieurs façons d'évaluer les bénéfices économiques associés aux services écosystémiques selon par exemple l'usage du service. À la lumière de ces précisions, les sections qui suivent représentent un portrait théorique et non exhaustif de chacun des services écosystémiques évalués sur le territoire de la MRC Nicolet-Yamaska. Un ensemble de recommandations pour améliorer chacun des services écosystémiques étudiés est également proposé. L'emphase est portée sur les milieux agricoles puisqu'ils représentent le principal type d'occupation des sols du territoire de la MRC, mais également, car ces milieux, lorsqu'ils sont gérés de manière conventionnelle, ont souvent un impact négatif sur la fourniture en services écosystémiques (si ce n'est la fourniture de denrées alimentaires).

### 1.1.1. Contrôle de l'érosion

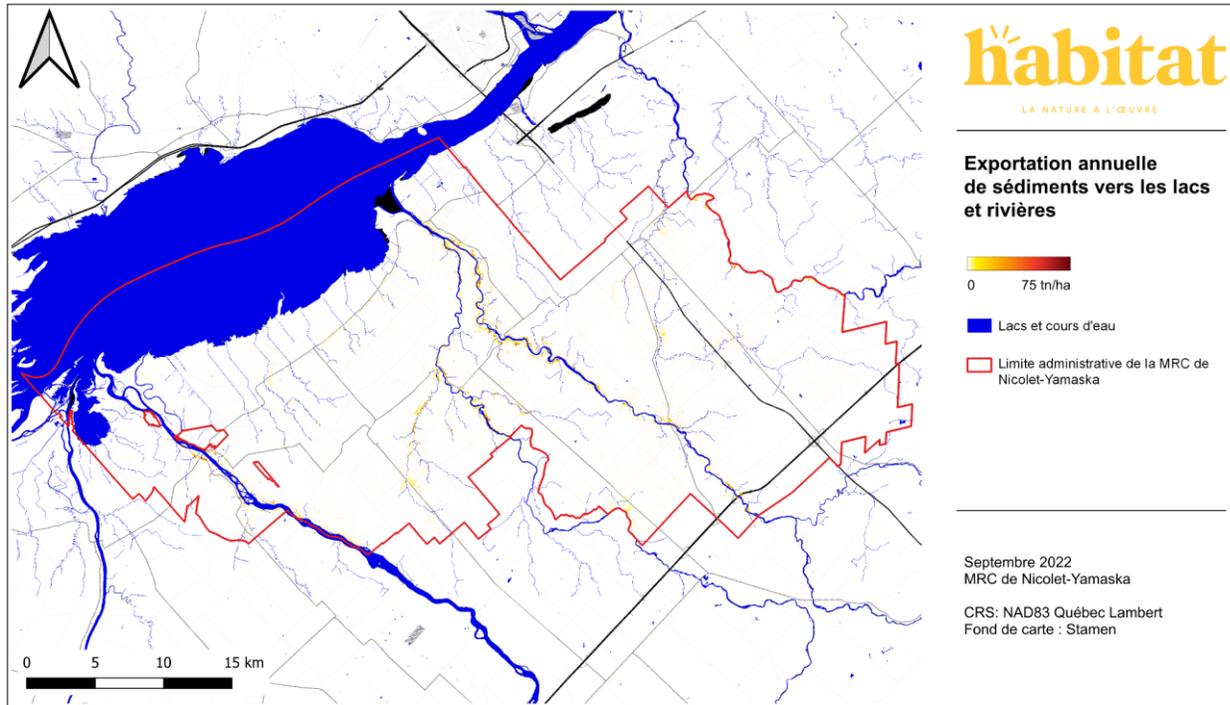
L'érosion est un phénomène physique directement influencé par la couverture végétale, le type de sol, la pente et les précipitations. Les végétaux, grâce à leurs feuilles, diminuent la vitesse et la force d'impact des gouttes de pluie lorsqu'elles touchent le sol tandis que le système racinaire des plantes aide à maintenir les sols en place.

Les lieux fortement végétalisés tels que les milieux forestiers sont ainsi des espaces propices pour limiter le transfert de sédiments vers les milieux aquatiques. À l'inverse, les zones peu végétalisées ou qui le sont seulement durant une partie de l'année (ex. les milieux agricoles) sont des espaces où la rétention des sédiments est faible et l'érosion élevée.

Basée sur la présence et la distribution des milieux naturels au sein du territoire, l'analyse réalisée permet d'évaluer la quantité, en tonne, de sédiments exportés vers les cours d'eau ou retenus par les milieux naturels et elle identifie spatialement les zones d'érosion (*figure 3*; méthodologie présentée en annexe).

---

<sup>1</sup> La notion de pluralité des valeurs des services fait référence au fait que l'évaluation et la valorisation des services écosystémiques reposent sur trois types de valeurs : la valeur instrumentale (c.-à-d. valeur économique et/ou biophysique associée à un service), la valeur intrinsèque (c.-à-d. valeur inhérente à un milieu naturel comme la valeur d'existence) et la valeur relationnelle (valeur qui repose sur les interactions des humains avec le milieu naturel).



**Figure 3.** Exportation annuelle des sédiments vers les lacs et rivières du territoire de la MRC Nicolet-Yamaska.

Grâce à leur présence, les milieux naturels permettent de retenir annuellement **327 533 tonnes de sédiments** qui seraient autrement charriées vers les cours d'eau et lacs de la région si l'intégralité du territoire était dépourvue de végétation. Par ailleurs, comme le territoire de la MRC est relativement plat, les sédiments voyagent peu, ce qui signifie que les zones d'érosion se situent majoritairement le long des principaux cours d'eau soit les rivières Nicolet, Nicolet Sud-Ouest, Saint-Zéphirin et Saint-François. Les secteurs urbains le long des rivières (p. ex. Nicolet, Saint-Léonard-d'Aston, Pierreville et Saint-François-du-Lac) sont également des zones marquées par les processus d'érosion. **Au total, 20 882 tonnes de sédiments sont exportées annuellement vers les milieux aquatiques (46,8 mg/l)**, une valeur légèrement au-dessus de la moyenne à l'échelle des différents bassins versants québécois (38,9 mg/l; Patoine 2017).

Les quantités de sédiments retenues par les milieux naturels ou exportées vers les cours d'eau peuvent ensuite être traduites économiquement selon un ensemble de coûts lié à l'utilisation du territoire. L'étude de Hansen & Ribaldo (2008), réalisée aux États-Unis, a servi de base pour définir les coûts associés au traitement des sédiments pour le territoire de la MRC (*tableau 1*). Selon le contexte géographique, d'autres types d'usages pourraient être ajoutés ou retirés pour moduler l'estimation du coût total.

**Tableau 1.** Coût de traitement des sédiments selon les catégories d’usage pour les catégories applicables au territoire de la MRC Nicolet-Yamaska.

CATÉGORIES	BÉNÉFICES ET/OU BÉNÉFICIAIRES	ÉTENDUE DE VALEURS (\$2022/t)
Loisirs aquatiques	Meilleure qualité de l’eau pour les loisirs	0 à 19,25
Fossés et canaux d’irrigation	Réduction des coûts pour retirer les sédiments et les plantes aquatiques	0,026 à 2,23
Fossés de drainage routier	Moins de dommages et d’inondations sur les routes	0,44
Station d’épuration de l’eau	Coût réduit pour le traitement des sédiments	0,91 à 3,16
Dommages liés aux inondations	Réduction du nombre d’inondations et des dommages associés	0,22 à 1,68
Usage municipal et industriel de l’eau	Réduction des dommages liés aux sels et minéraux dissous provenant des sédiments	0,16 à 3,21
Productivité des sols	Réduction des pertes de productivité des sols	0,81 à 2,64

À noter que pour chaque catégorie du tableau, une gamme de valeurs est proposée. Ces variations sont dues au fait que les coûts et bénéfices varient selon la taille du cours d’eau, sa localisation, sa fréquentation, le matériel utilisé pour gérer le problème, etc.

Selon l’organisation spatiale du territoire et les variables choisies, il est ainsi possible d’estimer, à titre purement théorique, le coût de traitement évité à la société en comparant le territoire actuel à un territoire qui serait dépourvu de toute végétation. **Le coût évité grâce à la rétention des sédiments par les milieux naturels varie alors entre 840 450 et 10 680 851 \$ annuellement** à l’échelle de la MRC.

À l’inverse, en reprenant les mêmes variables de coûts que pour la rétention (*tableau 1*), **le montant annuel à payer par la MRC serait compris entre 53 583 \$ et 680 962 \$ si elle décidait de traiter l’intégralité des sédiments exportés vers les milieux aquatiques à l’échelle du territoire.**

## Recommandations

Les phénomènes d'érosion relèvent d'une combinaison d'éléments, soit une couverture végétale clairsemée ou absente, la présence de pentes et, dans le cas particulier des milieux agricoles, un ensemble de pratiques pouvant perturber les sols (ex. labour). Limiter l'érosion implique ainsi d'agir sur au moins un de ces éléments.

Assurer que les secteurs sensibles à l'érosion soient correctement végétalisés est une première recommandation. La figure 3 permet en outre d'identifier les secteurs qui s'érodent le plus et donc à revégétaliser en priorité, comme le long des rivières Nicolet et Nicolet-Ouest. La restauration des coulées agricoles du territoire, espaces pentus, en friche et située entre un cours d'eau et un milieu agricole est également suggérée. Habitat a mené en 2022 un projet pour délimiter les coulées agricoles dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, estimer les services écosystémiques associés à leur restauration et collabore actuellement avec le Jour de la Terre Canada à la restauration de ces espaces<sup>1</sup>.

Il est aussi important de favoriser la conservation des zones tampons le long des lacs et cours d'eau. Au Québec, l'obligation légale est de maintenir une bande minimale de 3 mètres le long des milieux aquatiques, mais les municipalités et MRC ont également la possibilité d'adopter des mesures additionnelles. La MRC Nicolet-Yamaska a d'ailleurs légiféré en ce sens puisque depuis 2006 les bandes riveraines le long des rivières Bécancour, Nicolet Sud-Ouest et Sud-Est, Saint-François, Yamaska et le long du lac Saint-Pierre et du fleuve Saint-Laurent doivent être d'une largeur minimale de 10 mètres (MRC Nicolet-Yamaska 2019). Les bandes riveraines sont les derniers espaces terrestres parcourus par les sédiments avant que ceux-ci ne finissent dans les milieux aquatiques. Sans ces barrières naturelles qui ralentissent les eaux de ruissellement et retiennent les sédiments, l'exportation de sédiments ne sera pas freinée ce qui nuira aux écosystèmes aquatiques (ex. turbidité de l'eau, ensablement) et aura des conséquences sur les activités récréotouristiques (ex. pêche et navigation) et les coûts de traitement de l'eau (Tong & Chen 2002; Ernst et al. 2004).

Enfin, en milieu agricole, la mise en place de haies brise-vent et/ou de cultures de couverture sont des actions à promouvoir pour leurs nombreux bénéfices et notamment l'atténuation de l'érosion éolienne (ex. Daryanto et al. 2018; Hoorman 2009). Davantage de détails sur les cultures de couverture sont fournis à la section suivante.

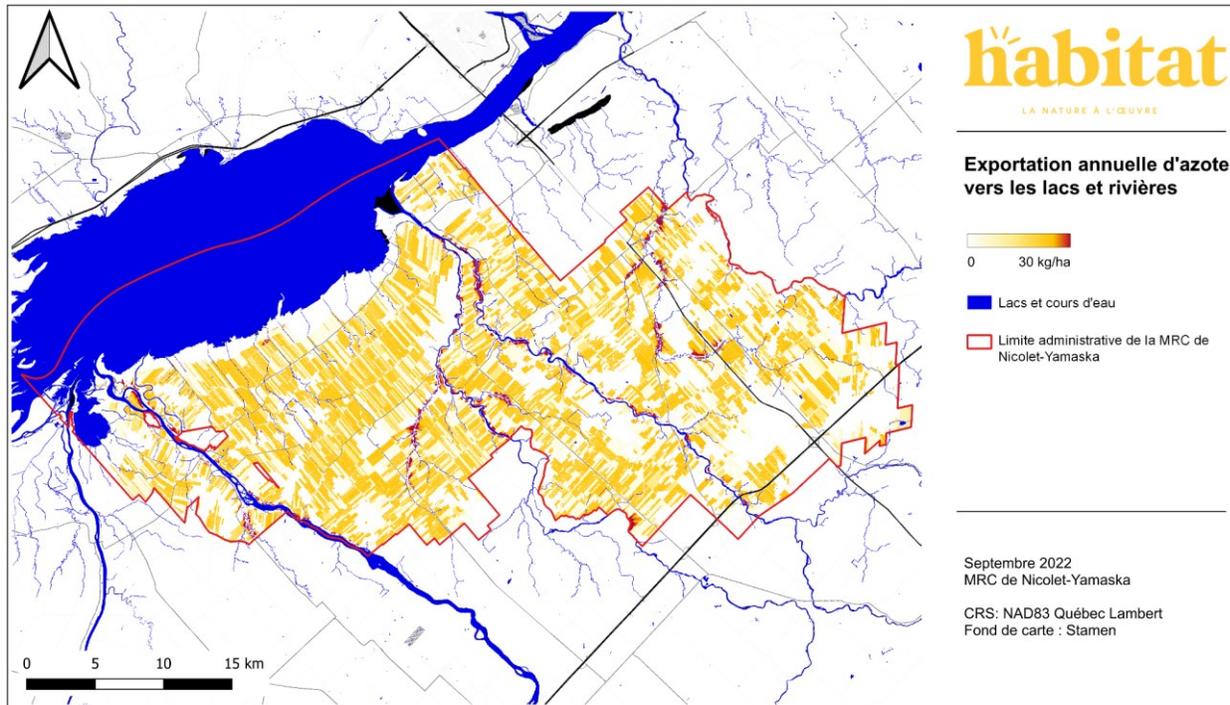
### 1.1.2. Contrôle des polluants vers les milieux aquatiques

L'apport excessif de nutriments, principalement l'azote et le phosphore, majoritairement issus de l'agriculture conventionnelle, d'installations septiques désuètes ou de l'épandage de fertilisants sur terrains privés, mène à la dégradation des écosystèmes aquatiques par eutrophisation (ex. Howarth et al. 2000). L'eutrophisation entraîne l'apparition d'algues bleues/vertes nuisibles (cyanobactéries), la mort des poissons en raison de l'appauvrissement en oxygène des eaux de fond et la perte de biodiversité (ex. Vitousek et al. 1997), avec un impact négatif important sur la santé humaine et les économies locales (ex. Dodds et al. 2009; Gilbert et al. 2010).

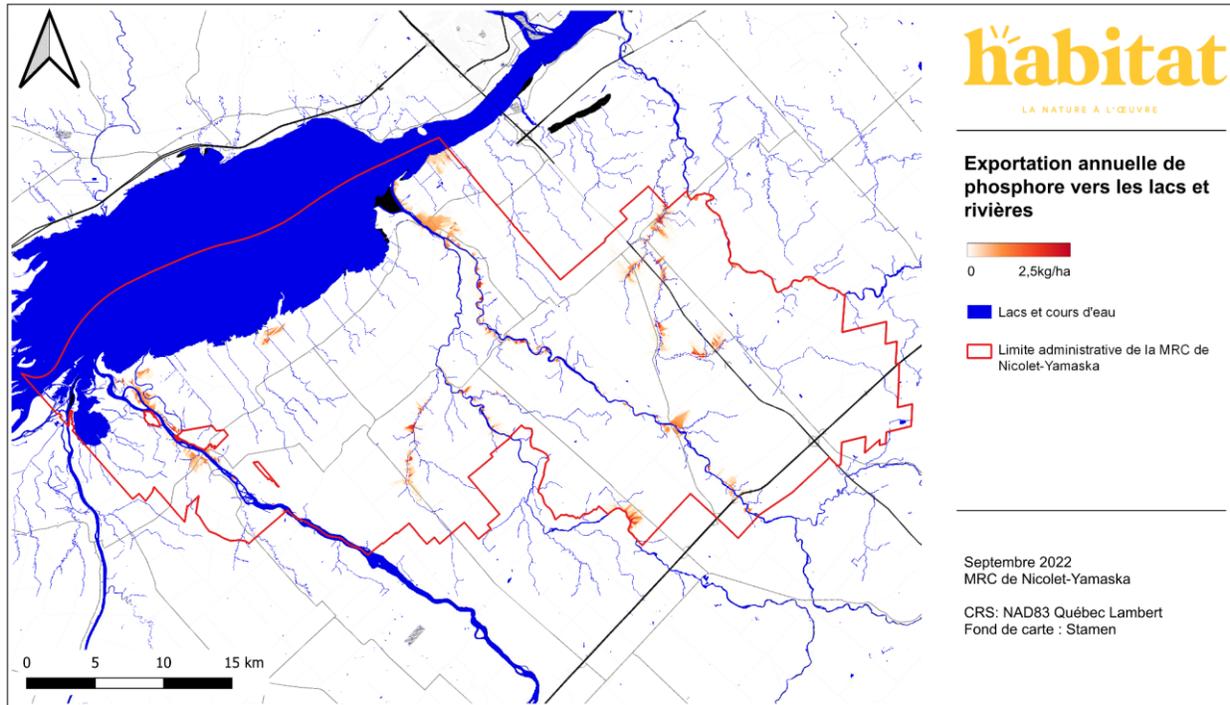
Comme dans le cas de l'érosion, les milieux naturels (forestiers et humides) jouent un rôle de contrôle des nutriments. En effet, la végétation absorbe directement dans ses tissus les éléments chimiques lors de sa croissance. Ainsi plus la végétation est abondante, plus elle capte de nutriments, ce qui limite leur

transfert vers les milieux aquatiques. Le réseau racinaire de la végétation ralentit également l'écoulement des eaux de surface et souterraines, ce qui donne davantage de temps aux plantes pour absorber des nutriments. Les mesures permettant d'améliorer la régulation de l'azote et du phosphore par les végétaux sont donc particulièrement recommandées dans les territoires très agricoles.

Basées sur la présence et la distribution des milieux naturels au sein du territoire, les analyses réalisées permettent de connaître les quantités, en kilogramme, d'azote (*figure 4*) et de phosphore (*figure 5*) exportés vers les cours d'eau (méthodologie présentée en annexe) et d'identifier spatialement les lieux d'où proviennent ces exportations.



**Figure 4.** Exportation annuelle d'azote vers les lacs et les rivières du territoire de la MRC Nicolet-Yamaska.



**Figure 5.** Exportation annuelle de phosphore vers les lacs et les rivières du territoire de la MRC Nicolet-Yamaska.

Selon les analyses réalisées, la quantité d’azote exporté chaque année vers les cours d’eau est estimée à 900 419 kilogrammes (1,1 mg/l), soit légèrement inférieures à la moyenne des bassins versants du Québec (1,3 mg/l; Patoine 2017). Dans le cas du phosphore, le modèle estime une exportation annuelle de 1 420 kilogrammes (0,06 mg/l), là encore inférieur à la moyenne des bassins versants du Québec (0,08 mg/l; Patoine 2017).

La répartition spatiale des cultures sur le territoire, les besoins variables en intrants chimiques d’un type de culture à l’autre et l’existence de zones tampons renseignent sur les portions du territoire où la pollution chimique des cours d’eau est la plus forte. Selon le guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ 2010), la culture de maïs, qui représente environ 40 % des superficies agricoles de la MRC, est l’une des cultures les plus gourmandes en azote. L’azote a également une capacité de déplacement élevée dans l’environnement, ce qui implique une répartition homogène des zones d’exportation au sein de la MRC (*figure 4*). Dans le cas du phosphore, cet élément chimique est peu mobile dans l’espace. Son exportation vers les milieux aquatiques se limite donc aux abords des cours d’eau (*figure 5*). De plus, toujours selon le guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ 2010), les cultures de canneberges, de petits fruits et les vignobles (environ 1 % des superficies agricoles) nécessitent de fortes quantités de phosphore. À noter finalement que la position géographique de la MRC, placée en aval de plusieurs grands bassins versants agricoles, favorise un apport non négligeable de nutriments venant de l’amont.

La quantité de nutriments exportés vers les milieux aquatiques peut ensuite être évaluée économiquement. Dans le cas de l'azote, le coût de traitement est compris entre 4,14 \$ et 11,57 \$ par kilogramme<sup>2</sup> (Olewiler 2004). Ainsi, **le montant annuel à payer par la MRC serait compris entre 3 727 735 \$ et 10 417 848 \$ si elle décidait de traiter l'intégralité de l'azote exporté vers les milieux aquatiques.**

Dans le cas du phosphore, le coût de traitement équivaut à 6,46 \$ par kilogramme (J. Duguay, directeur service environnement Ville de Mirabel, échange courriel, 29 septembre 2021). **Le coût annuel de traitement de l'intégralité du phosphore exporté vers les milieux aquatiques serait ainsi égal à 8 518,5 \$/an.**

À noter que les chiffres de cette section prennent uniquement en compte la quantité d'intrants chimiques utilisée au cours de l'année et exportée vers les lacs et rivières. À cela s'ajoutent les quantités d'azote et de phosphore accumulées dans l'environnement au cours du temps et peu à peu exportées vers les rivières, en particulier lors des années très pluvieuses (Chen et al. 2014, 2015; Sharpley et al. 2013). Ce processus appelé « effet d'héritage » est d'ailleurs très présent dans les bassins versants agricoles du sud de Québec (Goyette, Bennett & Maranger 2018).

## Recommandations

La qualité de l'eau des milieux aquatiques peut être affectée par l'apport terrestre de sédiments et de nutriments. Les rivières et lacs des grandes régions agricoles sont ainsi souvent davantage pollués que ceux du reste du territoire. Le territoire de la MRC Nicolet-Yamaska est d'ailleurs particulièrement sujet à ce phénomène puisque la MRC et ses alentours constituent les principales zones agricoles du Québec. La MRC est de plus la région la plus en aval de ces grands bassins versants agricoles ce qui renforce les problématiques de pollution des cours d'eau.

Pour atténuer ce phénomène, les mêmes prescriptions que celles pour lutter contre l'érosion sont suggérées, soit la végétalisation des espaces faisant l'interface entre les milieux aquatiques et agricoles. L'élargissement des bandes riveraines est également à mettre de l'avant tout comme le fauchage annuel de ces espaces et des fossés agricoles. Le fauchage permet d'éviter la saturation des plantes en éléments chimiques. Les zones aux forts taux d'exportation de nutriments visibles aux figures 4 et 5 sont en outre des territoires prioritaires pour mettre en place les mesures évoquées dans ce paragraphe.

Les engrais synthétiques peuvent notamment être remplacés par la mise en place de cultures de couverture dont les bénéfiques sont multiples. Les cultures de couverture permettent de maintenir actifs les microorganismes du sol, elles mobilisent les éléments fertilisants (fixation d'azote par les légumineuses et libération du phosphore par les mycorhizes), améliorent l'infiltration de l'eau au printemps, stoppent les cycles de certains ravageurs et maladies et fournissent une source alimentaire aux pollinisateurs. La présence d'une couverture de sol peut également réduire le développement de mauvaises herbes et donc l'obligation de labourer, ce qui limite également l'érosion hydrique et éolienne ainsi que le relâchement de carbone dans l'atmosphère. Bien que la mise en place de cultures de couverture implique de procéder au semi-direct au printemps, cette technique évite l'usage de charrue et réduit donc d'autant plus

---

<sup>2</sup> Valeurs mise à jour pour 2022 en tenant compte de l'inflation.

l'érosion. De nombreux guides existent pour choisir quelles cultures de couverture mettre en place au Québec (ex. CRAAQ 2022), mais il est généralement recommandé de mélanger les plantes de couverture pour plus d'avantages et une meilleure survie comparativement à une culture monospécifique. Le programme Prime-Vert accorde également des subventions aux producteurs pratiquant la culture de couverture (MAPAQ, en ligne).

### **1.1.3. Recharge des nappes souterraines et atténuation du ruissellement de surface**

Le Canada, et plus encore le Québec, possède de vastes réserves d'eau douce comparativement au reste de la planète. En moyenne, les précipitations annuelles provinciales sont de 1 000 millimètres et une augmentation de celles-ci a été observée sur la période 1960-2013, de l'ordre de 2,5 mm/an (MELCC non daté). Le volume des précipitations du Centre-du-Québec devrait pour sa part continuer à croître dans le futur, passant de 1 093 mm/an de nos jours à 1 145 mm/an en 2041-2070 (Ouranos 2021). Cette augmentation sera en revanche accompagnée d'une hausse des températures (entre 2,5 et 3,2 °C) (Ouranos 2021), ce qui mènera à davantage d'évapotranspiration et un plus grand risque de stress hydrique pour les plantes.

L'eau est une ressource particulièrement importante pour l'agriculture, mais au Québec les besoins en irrigation sont généralement faibles. Un total de 5 % des terres agricoles irriguées du Canada se situent en outre au Québec (Statistique Canada 2014).

Les changements climatiques risquent toutefois de modifier le bilan hydrique régional. Les précipitations futures, bien que plus importantes, pourraient être moins régulières et accompagnées de phénomènes météorologiques extrêmes (ex. pluie intense ou période de sécheresse), qui entraîneront davantage d'inondations et de pénuries d'eau locale.

Les analyses réalisées permettent de modéliser le bilan hydrique actuel du territoire de la MRC selon ces trois principaux paramètres principaux :

1. La recharge lente des cours d'eau via les écoulements souterrains
2. La recharge rapide des cours d'eau via le ruissellement de surface
3. L'évapotranspiration via la végétation.

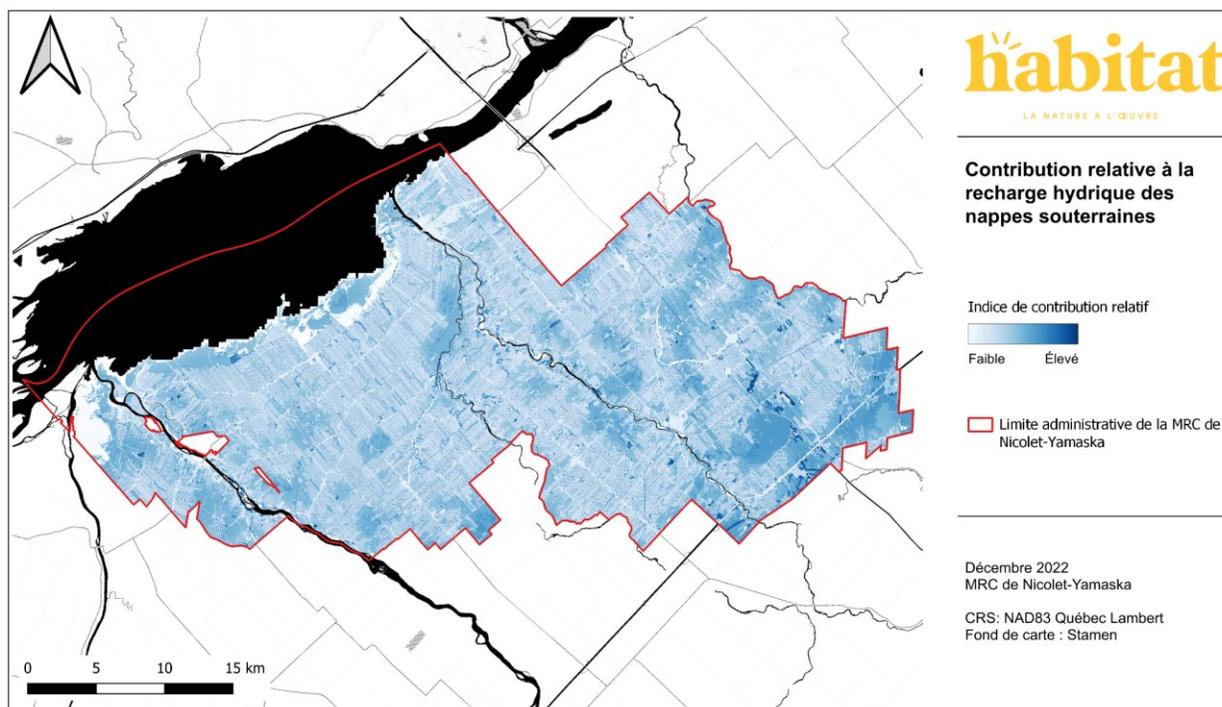
Selon chaque type d'occupation des sols, la proportion des trois paramètres varie (méthodologie présentée en annexe). Un milieu forestier a par exemple une très grande capacité d'absorption de l'eau, ce qui réduit le ruissellement de surface et contribue à la recharge des nappes souterraines. Les nappes souterraines alimentent ensuite lentement les cours d'eau, notamment en période d'étiage. À l'inverse, un milieu urbain (majoritairement imperméabilisé) participe à la recharge rapide des cours d'eau via le ruissellement de surface, mais les risques de crue subite et d'érosion sont élevés. L'évapotranspiration correspond pour sa part à l'émission de vapeur d'eau dans l'atmosphère depuis le sol et la surface des végétaux.

La modélisation du bilan hydrique ainsi prend en compte un ensemble de variables, telles que des données de précipitations et d'évapotranspiration pour chaque mois des années 2009 à 2018, le relief du territoire,

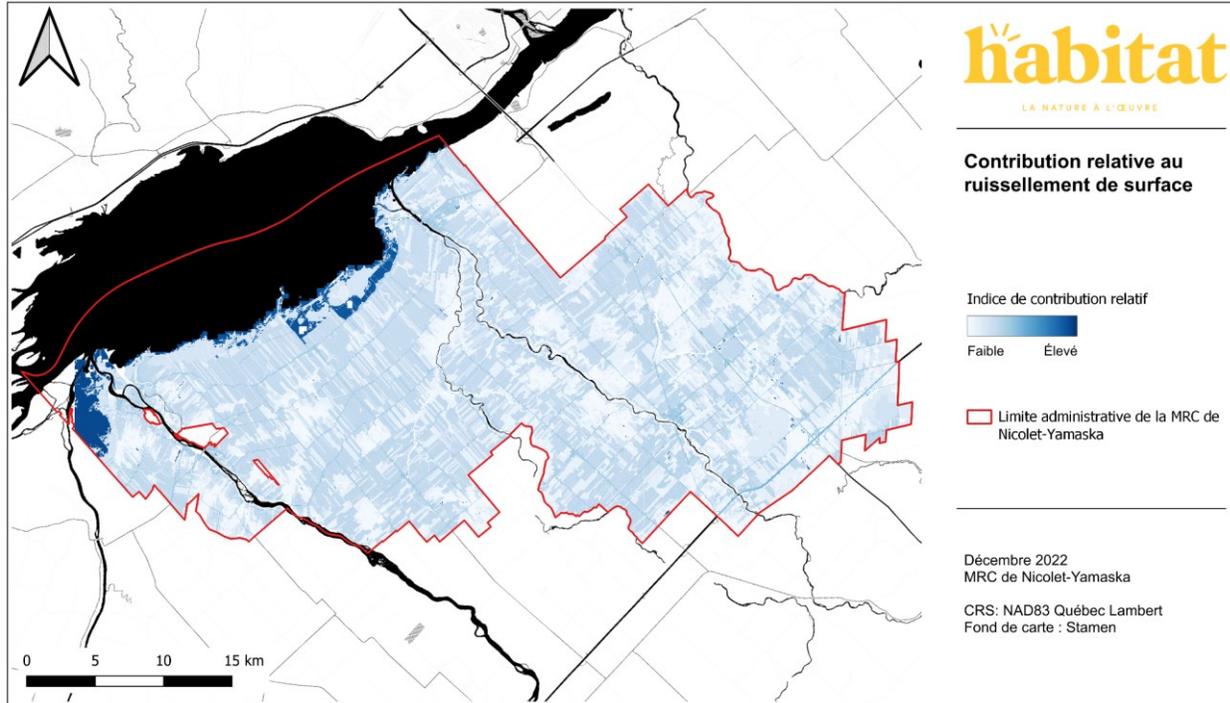
le type d'occupation des sols et les groupes hydrologiques des sols (leur capacité à absorber de l'eau ou la laisser ruisseler). Le pompage de l'eau (ex. irrigation pour l'agriculture, les résidents, les industries) n'est en revanche pas pris en compte dans cette analyse. Une partie du littoral du lac Saint-Pierre n'est également pas couverte par des données nécessaires à l'analyse. Ces secteurs ne sont ainsi pas modélisés.

La contribution de chaque type d'occupation des sols à la recharge des nappes souterraines et au ruissellement de surface est offerte, via le modèle utilisé, en valeurs absolues (valeurs quantitatives) et relatives (valeur qualitative). Il est toutefois recommandé de se baser sur les valeurs relatives pour interprétation. Les figures 6 et 7 ci-dessous indiquent respectivement la contribution relative des différentes composantes du territoire à la recharge des nappes souterraines au sein de la région d'étude ou au ruissellement de surface. Dans le cas de la recharge des nappes souterraines, un indice de contribution relatif élevé signifie que le territoire participe beaucoup à stabiliser les niveaux d'eau en absorbant une part importante des précipitations reçues.

Dans le cas du ruissellement de surface, un indice élevé correspond à un ruissellement important des précipitations reçues et donc à une faible absorption des sols pouvant mener à des crues subites.



**Figure 6.** Contribution des types d'occupation des sols à la recharge hydrique des nappes souterraines sur le territoire de la MRC Nicolet-Yamaska.



**Figure 7.** Contribution des types d’occupation des sols au ruissellement de surface sur le territoire de la MRC Nicolet-Yamaska.

L’Est, le Centre et le Sud du territoire contribuent le plus à la recharge des nappes souterraines du territoire, et donc à la recharge lente des cours d’eau. Ces régions sont recouvertes de milieux boisés et de milieux humides boisés, les deux types de milieux ayant la plus grande capacité à absorber l’eau. En milieu agricole, la contribution à la recharge des nappes souterraines varie selon le type de culture. Par exemple, les cultures pérennes et pâturages contribuent davantage à la recharge des nappes souterraines que le maïs ou le soja. La variabilité des contributions à la recharge hydrique est également fortement influencée par l’évapotranspiration générée par la végétation, notamment en milieu agricole (p. ex. Allen et al. 1998; Nistor 2018). L’Est du territoire reçoit également davantage de pluie et se caractérise par des sols entraînant moins de ruissellement de l’eau, ce qui augmente la recharge des nappes souterraines de cette portion du territoire (Ouranos 2021). L’embouchure de la rivière Yamaska et certaines portions du littoral du lac Saint-Pierre sont caractérisées par un ruissellement de surface important puisqu’il s’agit de milieux humides non boisés de type mare ou eau peu profonde. Les précipitations reçues sont ainsi directement transmises à la rivière Yamaska ou au lac Saint-Pierre.

Bien que certains secteurs participent parfois plus localement à la recharge des nappes souterraines, les milieux naturels (p. ex. les forêts et les milieux humides boisés) jouent un rôle important dans la recharge régionale des nappes souterraines. L’écoulement des eaux souterraines est essentiel pour maintenir la santé des écosystèmes qui dépendent des eaux souterraines, surtout pendant les périodes les plus sèches (Kløve et al., 2011). En outre, les changements climatiques risquent d’augmenter la fréquence des événements hydrométéorologiques extrêmes, modifier les configurations de précipitations et altérer les régimes hydrologiques en raison des événements de fonte de plus en plus précoces. Dans ces circonstances, les eaux souterraines peuvent servir de tampon critique contre les chocs climatiques

potentiels pour non seulement les systèmes naturels, mais aussi les systèmes anthropiques. Prioriser la protection des milieux naturels existants (et même leur agrandissement et leur restauration) pour assurer une recharge adéquate des nappes souterraines peut améliorer la santé des écosystèmes et leur capacité adaptative face aux changements climatiques et au stress hydrique.

## Recommandations

Si la MRC souhaite améliorer son bilan hydrique, il est suggéré de planter des arbres et des plantes vivaces dans les lieux faiblement végétalisés puisque les végétaux réduisent le ruissellement et améliorent l'absorption de l'eau dans le sol. L'augmentation des précipitations au cours des prochaines décennies, et leur caractère plus extrême (Ouranos 2021), laissent craindre une augmentation des phénomènes d'inondation et une érosion plus intense. La plupart des milieux urbains de la MRC, où les dommages seraient les plus sévères, sont d'ailleurs proches de cours d'eau (p. ex. Nicolet, Saint-Léonard-d'Aston, Saint-François-du-Lac). Il est également préférable de conserver les milieux humides existants plutôt que de les détruire et reconstruire ailleurs comme encore autorisé selon le règlement sur la compensation pour l'atteinte aux milieux humides et hydriques. Les milieux humides sont des écosystèmes bien connus pour réguler les niveaux d'eau, prévenant ainsi les inondations (Mitsch & Gosselink 2000). La création de nouveaux milieux humides ne remplira pas instantanément les fonctions de milieux humides présents depuis des décennies, voire plus.

En milieu agricole, les cultures pérennes sont par ailleurs à favoriser à l'inverse des cultures annuelles. Le sol mis à nu une partie de l'année est en effet moins favorable à l'absorption de l'eau de pluie et accentue l'érosion. Dans le même ordre d'idées, il est également suggéré de laisser sur place les résidus de culture pour protéger les terres agricoles de l'érosion. Cette pratique permet de réduire le débit du ruissellement des eaux de surface et favorise une meilleure infiltration de l'eau dans le sol.

### 1.1.4. Contribution à la pollinisation

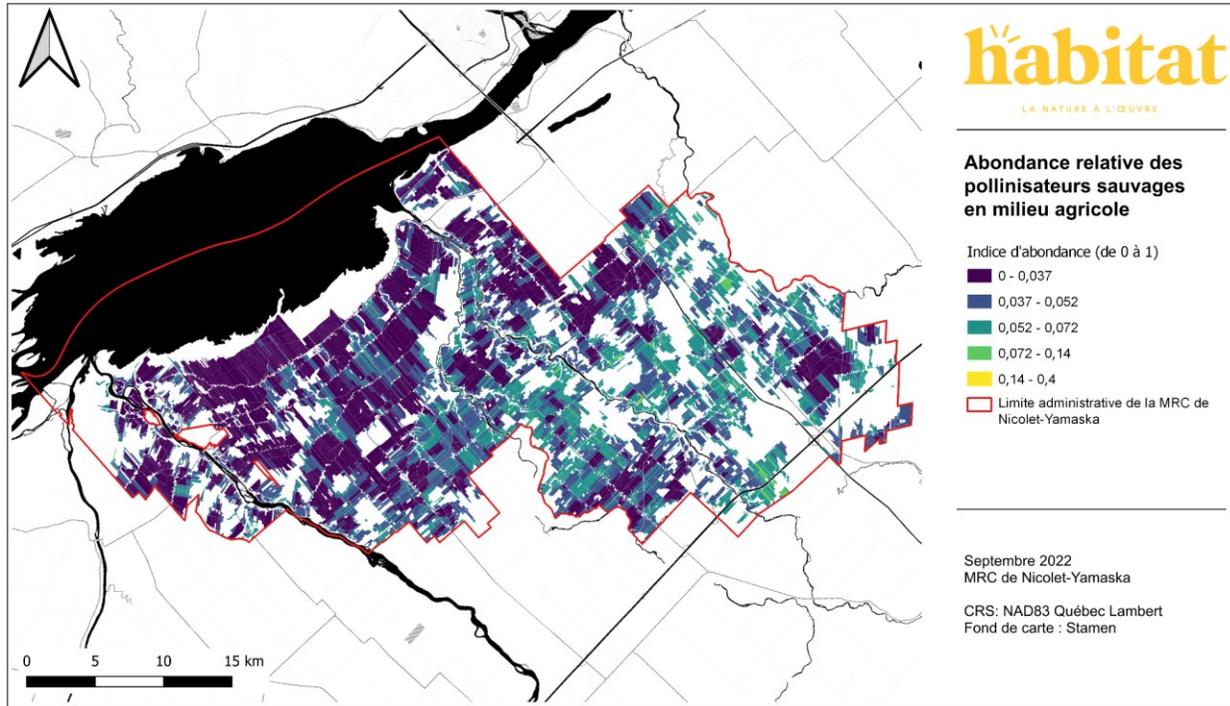
La pollinisation des cultures par les insectes et animaux est un service écosystémique permettant d'augmenter le rendement et la qualité de fruits et légumes aussi divers que la tomate, le canola, la pomme, le tournesol ou le bleuet. Selon certaines études scientifiques, 87 des 115 cultures d'importance mondiale tirent profit de la pollinisation par les animaux (Klein et al 2007), un service dont la valeur varie annuellement de plusieurs milliards à plusieurs dizaines de milliards dans le monde (p. ex. Porto & al. 2020).

L'analyse réalisée estime l'abondance relative de cinq insectes pollinisateurs en se basant sur des études antérieures pour le sud du Québec sur les abeilles sauvages (Martins et al. 2017; 2018). L'abondance des pollinisateurs dépend de la disponibilité en sites de nidification et en ressources florales dans le rayon d'action des pollinisateurs (méthodologie présentée en annexe). Les résultats présentés à la figure 8 correspondent à des indices relatifs d'abondance des pollinisateurs. Les résultats présentés à la figure 9 représentent quant à eux la dépendance des milieux agricoles à la pollinisation. Les indices d'abondance et de dépendance varient de 0 à 1 pour chacun des milieux agricoles de la MRC.

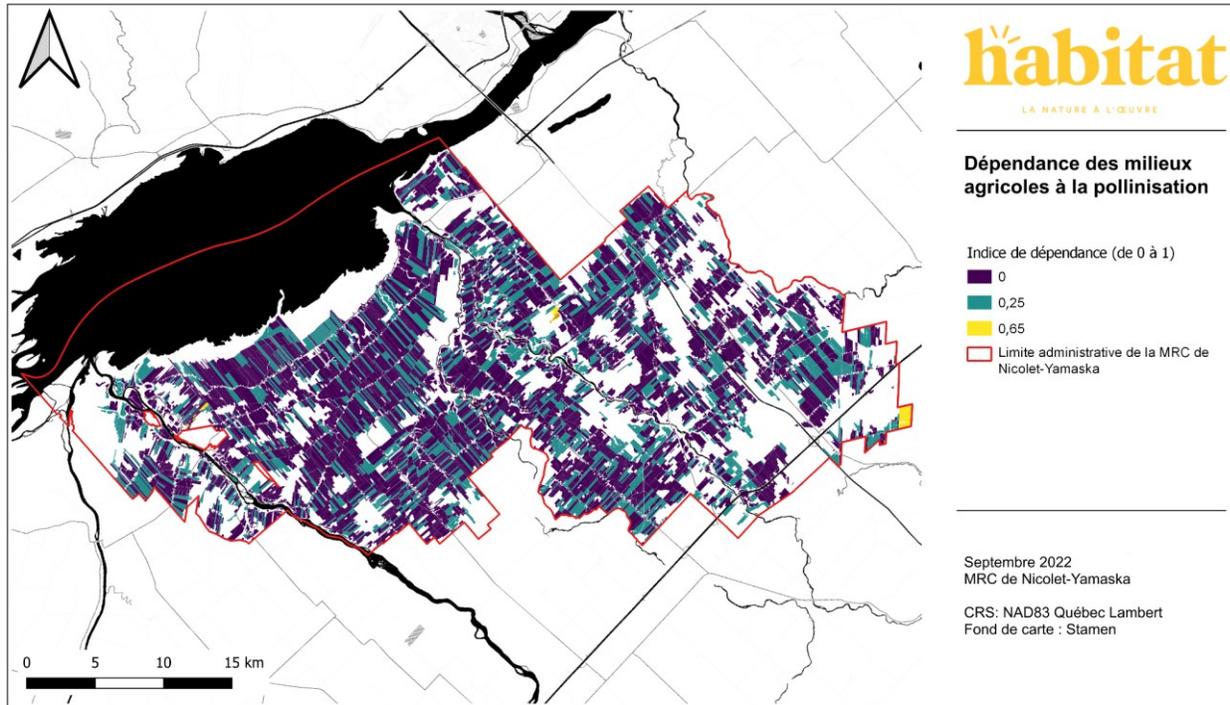
Un indice d'abondance élevé (valeur de 1) indique que le milieu agricole est un site probable d'activité pour les pollinisateurs. À l'inverse, un indice d'abondance faible (valeur de 0) signifie l'absence de

pollinisateurs pour ce site, car les conditions pour leur survie (sites de nidification et ressources florales) ne sont pas assurées.

L'indice de dépendance indique pour sa part la nécessité de pollinisation des milieux agricoles par les insectes ou animaux. Un indice de dépendance élevé (valeur de 1) révèle que le milieu agricole est dépendant de la pollinisation pour la fructification tandis qu'une valeur de 0 signifie que le milieu agricole ne requiert pas d'être pollinisé pour la production de denrées agricoles.



**Figure 8.** Abondance relative des pollinisateurs sauvages en milieu agricole sur le territoire de la MRC Nicolet-Yamaska. Une échelle non linéaire a été utilisée pour représenter les valeurs d'abondance relative des pollinisateurs.



**Figure 9.** Dépendance des milieux agricoles à la pollinisation sur le territoire de la MRC Nicolet-Yamaska.

L'indice d'abondance des pollinisateurs sur le territoire de la MRC est très faible avec une valeur plafonnant à 0,4 (pour une valeur maximale de 1) et une valeur moyenne de 0,04 (*figure 8*). Ce score s'explique principalement par la matrice agricole, composée de grandes parcelles de cultures marchandes peu diversifiées et dépourvues d'habitat et de ressources florales nécessaires pour les pollinisateurs. Le territoire de la MRC manque ainsi de sites de nidifications de qualité comme les forêts feuillues, les pâturages ou les friches situées à proximité des cultures visitées par les pollinisateurs. Les cultures de soya et de maïs, représentant plus de 70 % des superficies cultivées, ne sont pas non plus des ressources alimentaires adéquates pour les pollinisateurs étudiés, ce qui limite leur abondance et répartition sur le territoire.

La dépendance des milieux agricoles à la pollinisation est quant à elle limitée (*figure 9*). Le maïs n'a par exemple aucunement besoin d'être pollinisé pour produire tandis que le soya a une dépendance à la pollinisation estimée à 25 % (Klein et al. 2007). Les principales cultures du territoire dépendantes de la pollinisation sont les canneberges, les petits fruits et les vergers, mais leurs superficies sont marginales (environ 1 % des superficies agricoles de la MRC).

## Recommandations

Le contexte paysager est actuellement peu propice aux pollinisateurs sauvages dans les milieux agricoles de la MRC, selon l'analyse effectuée (*figure 8*).

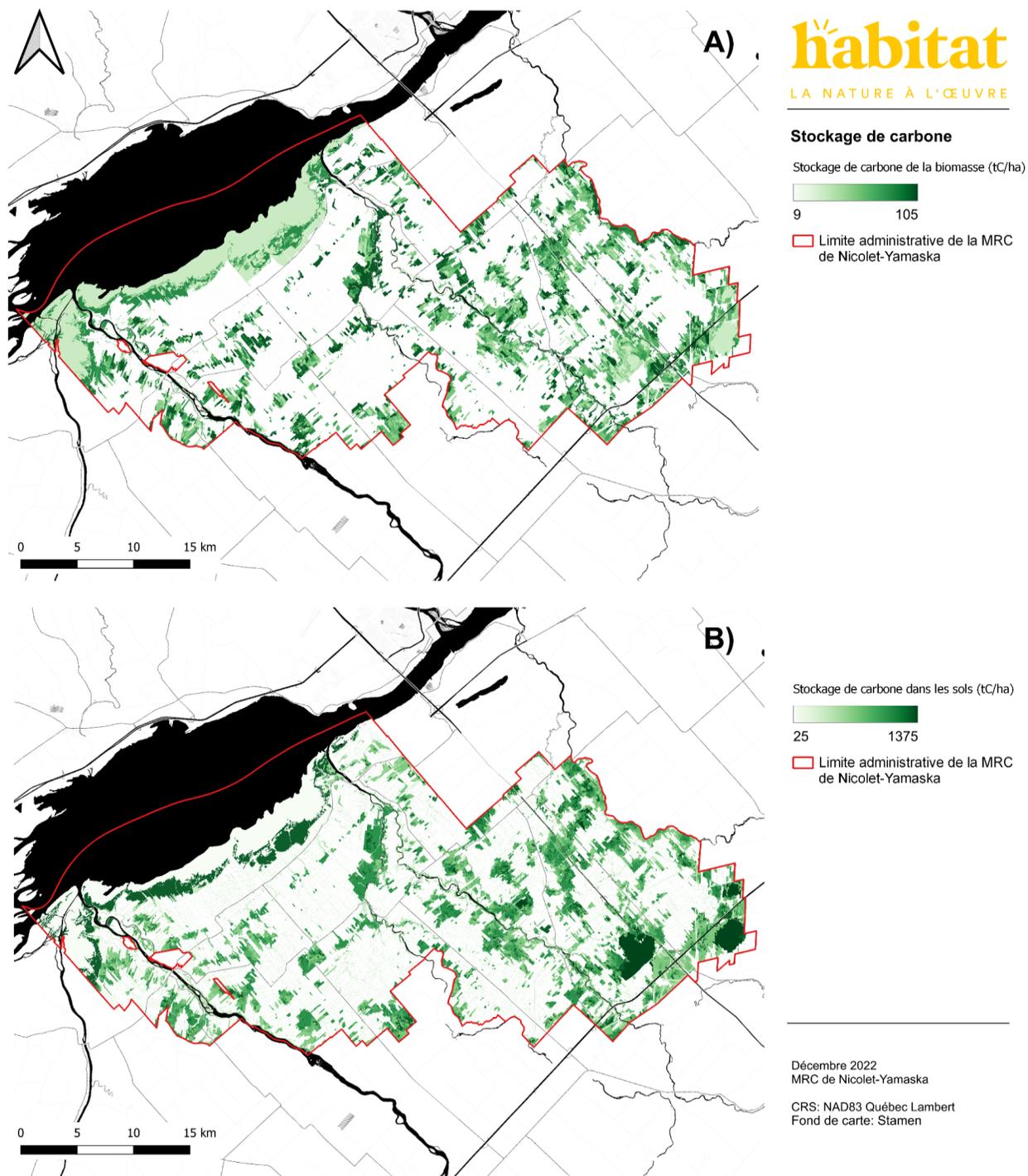
Étant principalement dominé par d'importantes étendues de monocultures, le système agricole de la MRC est peu résilient aux changements globaux futurs (p. ex. les changements climatiques, les ravageurs et les pathogènes). De plus, l'absence de pollinisateurs sauvages, dont les abeilles indigènes, et les milieux naturels sur lesquels ils dépendent, risque d'obliger les agriculteurs à importer des abeilles à miel domestique (*Apis mellifera* L.) pour polliniser les cultures (Marshman et al. 2019). La faible diversité de pollinisateurs exacerbe davantage la vulnérabilité du système (FAO 2019), d'autant plus que plusieurs maladies affectant les abeilles domestiques s'adaptent continuellement aux traitements couramment utilisés pour les combattre (Krongdang et al. 2017). Les résultats de l'analyse et les données annexes servent à identifier les régions vulnérables du territoire nécessitant une diversification des cultures et l'établissement d'habitats propices pour une diversité de pollinisateurs afin d'augmenter la résilience du système agricole.

Dans l'optique d'augmenter le nombre de pollinisateurs sauvages, il est recommandé de créer davantage de parcelles d'habitats et/ou d'améliorer la qualité des parcelles d'habitat existantes, en particulier à proximité des milieux agricoles dépendant de la pollinisation (Martins et al. 2018). Les espaces en friche et les pâturages sont par exemple des lieux particulièrement appréciés par les insectes (Martins et al. 2017). Dans une moindre mesure, les forêts mixtes et les espaces urbains peu denses offrent aussi des lieux de vie et d'alimentation satisfaisants (Martins et al. 2017).

### 1.1.5. Stockage du carbone par les milieux naturels

Les écosystèmes régulent le climat de la planète en faisant varier les concentrations de gaz à effet de serre tel que le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère. Les écosystèmes terrestres stockent collectivement beaucoup plus de carbone que l'atmosphère (p. ex. Scharlemann et al. 2014). En stockant le carbone dans le sol, la biomasse et la matière morte, les écosystèmes empêchent le CO<sub>2</sub> d'être relâché dans l'atmosphère, où il contribuerait au changement climatique. La perturbation des écosystèmes par le feu, les maladies ou la conversion des terres peut toutefois libérer de grandes quantités de CO<sub>2</sub>. À l'opposé, certaines pratiques, comme la restauration des forêts ou l'agriculture de conservation des sols, peuvent contribuer au stockage de grandes quantités de CO<sub>2</sub>. Par conséquent, la façon dont nous gérons les écosystèmes terrestres est essentielle à la régulation du climat.

Les quantités de carbone stocké ont été calculées pour l'ensemble des milieux naturels (boisés et humides) de la MRC selon deux analyses (méthodologie présentée en annexe). Une première analyse a ciblé le carbone stocké dans la biomasse aérienne (le tronc, les branches, l'écorce et les feuilles des végétaux) et souterraine (racines) (*figure 10A*). Les écosystèmes visés sont les milieux boisés et humides, lorsque ces derniers abritent une végétation ligneuse. La seconde analyse a été réalisée pour évaluer le carbone stocké dans le sol à une profondeur comprise entre 0 et 30 cm (*figure 10B*).



**Figure 10.** Quantité de carbone stocké dans la biomasse (A) et dans les sols (B) des milieux naturels de la MRC Nicolet-Yamaska. (Une échelle non linéaire a été utilisée pour représenter les valeurs de stockage de carbone dans les sols.)

Les quantités de carbone stocké et la valeur économique associée sont présentées au tableau 2. La conversion économique est basée sur le coût social du carbone, une estimation théorique des dommages causés à la société à la suite d'une augmentation du carbone atmosphérique (Fankhauser 1994). La tonne de carbone équivaut en 2022 à 204,7 \$, ou bien 55,77 \$ lorsque les valeurs sont exprimées en tonnes de CO<sub>2</sub> (Environnement et Changement climatique Canada 2020). Ainsi, selon les valeurs estimées, **les milieux naturels de la MRC abritent des stocks de carbone estimés à 244 milliards de dollars en coût social du carbone dans l'hypothèse que ces quantités soient émises vers l'atmosphère**. À titre d'exemple, cette quantité de carbone équivaut au retrait de la circulation de 1,3 milliards de voitures pendant un an ou à la consommation électrique annuelle de près d'un milliard de foyers canadiens<sup>3</sup>. Rappelons toutefois qu'il s'agit de stock de carbone et non de flux annuel (séquestration).

**Tableau 2.** Quantité de carbone stocké par les milieux naturels du territoire de la MRC Nicolet-Yamaska et valeur économique associée.

DESCRIPTION	VALEURS
Carbone dans la biomasse aérienne	198 498 149 tC
Carbone dans la biomasse souterraine	48 811 133 tC
Carbone dans le sol	946 034 450 tC
<b>Carbone total</b>	<b>1 193 343 732 tC</b>
<b>Carbone en équivalent CO<sub>2</sub><sup>4</sup></b>	<b>4 375 593 684 t éq. CO<sub>2</sub></b>
<b>Valeur économique totale</b>	<b>244 277 000 000 \$</b>

La quantité de carbone stocké dans la biomasse aérienne change en fonction de la composition de la forêt (c.-à-d. conifère, mixte ou feuillu) et la structure d'âge. Les vieilles forêts, et plus particulièrement les vieilles forêts de feuillus, stockent généralement plus de carbone dans leur biomasse aérienne que les autres forêts. À l'échelle de la MRC, la répartition des milieux boisés âgés et humides abritant des végétaux ligneux âgés est très hétérogène (*figure 10A*). Aucun patron spatial ne se dessine clairement.

<sup>3</sup> Selon le calculateur des équivalences des émissions de gaz à effet de serre canadien disponible à : <https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/calculateur/calculateur-ges.cfm#results>

<sup>4</sup> L'équivalent CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone) est une métrique utilisée pour comparer les émissions de divers gaz à effet de serre sur la base de leur potentiel de réchauffement global. Pour convertir une quantité de carbone en équivalent CO<sub>2</sub>, il faut multiplier par 3,67.

Dans le cas du carbone stocké dans la biomasse souterraine, mais surtout dans le sol, les milieux humides sont les écosystèmes les plus importants (on parle de « puits de carbone »), en particulier les tourbières et marécages. À titre d'exemple, un milieu forestier stocke en moyenne dans sa biomasse souterraine et son sol 69 tC/ha (Sothe et al. 2022) contre 945 tC/ha pour les marécages (Bernal & Mits 2012; Major 2020) et 1 372 tC/ha pour les tourbières (Garneau & van Bellen 2016; Major 2020; Webster et al. 2018). Ceci étant dit, à l'échelle de la MRC, les plus grandes quantités de carbone présentes dans le sol se situent à l'Est, sur le territoire de la municipalité de Sainte-Eulalie, puisqu'on y retrouve des tourbières boisées de grandes superficies. Les rives du lac Saint-Pierre, généralement constituées de marécages arbustifs, sont également des zones où les quantités de carbone stocké sont élevées (*figure 8B*).

Il est par ailleurs pertinent de mentionner que les différents stocks de carbone sont plus ou moins volatiles. Le carbone du sol et de la biomasse souterraine sont plus stables que le carbone stocké dans la biomasse aérienne puisque ce dernier est davantage sensible aux perturbations naturelles (p. ex. feu, épidémie d'insectes) et anthropiques (coupe forestière, conversion des terres). Par exemple, lors d'un feu de faible intensité ou d'une coupe forestière sans travail du sol, le stock de carbone de la biomasse aérienne peut diminuer au point de s'approcher d'une valeur nulle alors que le carbone de la biomasse souterraine et du sol reste similaire aux valeurs pré-perturbation.

## Recommandations

Les changements climatiques et leurs conséquences sont le résultat d'une concentration très élevée de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Éviter de relâcher davantage de carbone dans l'atmosphère est ainsi crucial pour ne pas amplifier les phénomènes déjà observés.

Dans cette optique, il est essentiel de limiter la conversion des terres, c'est-à-dire de changer le type d'occupation des sols d'un milieu naturel pour un type d'occupation anthropique, par exemple convertir un boisé en zone agricole ou urbaine. La conversion des terres représente d'ailleurs la seconde source de relâchement de carbone dans l'atmosphère après la combustion de combustibles fossiles (Pachauri & Reisinger 2008; Werf et al. 2009; Deng et al. 2016). La conversion des terres engendre une perte de la végétation et donc du carbone stocké dans la biomasse. La conversion perturbe également le sol qui représente le plus important puits de carbone des écosystèmes terrestres, dont ceux de la MRC Nicolet-Yamaska.

Parmi les écosystèmes terrestres, les milieux humides sont ceux qui stockent le plus de carbone, en particulier dans le sol, avec des stocks 10 à 20 fois supérieurs à ceux des forêts (voir section 2.1.5). Bien que la Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques propose un mécanisme pour restaurer ou créer de nouveaux milieux humides pour contrebalancer les pertes en milieux humides et hydriques, il est fortement recommandé de protéger les milieux naturels existants puisqu'ils stockent déjà du carbone. La création d'un milieu humide ne compensera pas avant des siècles la perte de carbone suite à la destruction d'un milieu humide (p. ex. Maziarz et al. 2019). Les vastes milieux humides de la MRC devraient ainsi rester des territoires non perturbés.

En parallèle de la préservation des milieux naturels, d'autres actions existent pour augmenter les stocks de carbone du territoire et ainsi participer à limiter les changements climatiques. On pense notamment au boisement ou à la création de prairies naturelles non perturbées en lieu et place de zones agricoles

abandonnées, ou d'espaces faiblement végétalisés. Le stock de carbone du sol augmente ainsi en moyenne de 0,3 tC/ha/an lorsqu'une terre agricole est convertie en prairie naturelle (Deng et al. 2016). En milieu urbain, la plantation d'arbres peut également être encouragée, notamment dans les espaces gazonnés fournissant peu de services écosystémiques. La plantation d'arbres en milieu urbain offre de plus un ensemble de co-bénéfices non négligeables (p. ex. régulation des températures, filtration des polluants atmosphériques, augmentation de la valeur des propriétés foncières), en particulier en contexte de changements climatiques.

Enfin, en milieu agricole, un ensemble de pratiques peut également être adopté pour conserver le carbone du sol. L'agriculture de conservation des sols regroupe plusieurs techniques qui visent à limiter la perturbation des sols. Les cultures de couverture impliquent par exemple de cultiver certaines plantes durant la période fin été-automne, après la culture commerciale, ou au début du printemps avant de planter la culture commerciale pour stocker du carbone et réduire l'émission de dioxyde d'azote (un gaz à effet de serre issu de la dégradation des fertilisants agricoles) provenant du champ. Comme ces cultures permettent de garder le sol en meilleure santé, les émissions provenant de la fabrication de fertilisant sont également évitées. Réduire le travail du sol (le labour) et l'agroforesterie, notamment l'implantation de haies brise-vent, augmentent également les stocks de carbone des sols agricoles en plus d'offrir divers avantages (p. ex. limitation de l'érosion et du transfert de polluants vers les cours d'eau, meilleure infiltration de l'eau de pluie dans les sols, contrôle des ravageurs). Une étude menée aux États-Unis estime par exemple que le fait de ne pas labourer les milieux agricoles évite l'émission de 30 kgC/ha (West & Marland 2002).

## **1.2 Connectivité écologique au sein du territoire**

---

La connectivité écologique fait référence à la capacité de déplacement des espèces animales à l'intérieur de leur aire de répartition. De façon synthétique, un paysage est caractérisé par une connectivité écologique élevée lorsque les milieux naturels qui le composent (forêts, milieux humides et friches) sont suffisamment proches pour permettre le déplacement des espèces selon leurs besoins. Les milieux anthropisés (routes, milieux urbains et agricoles) constituent très souvent des barrières au déplacement et fragmentent les aires de répartition des espèces.

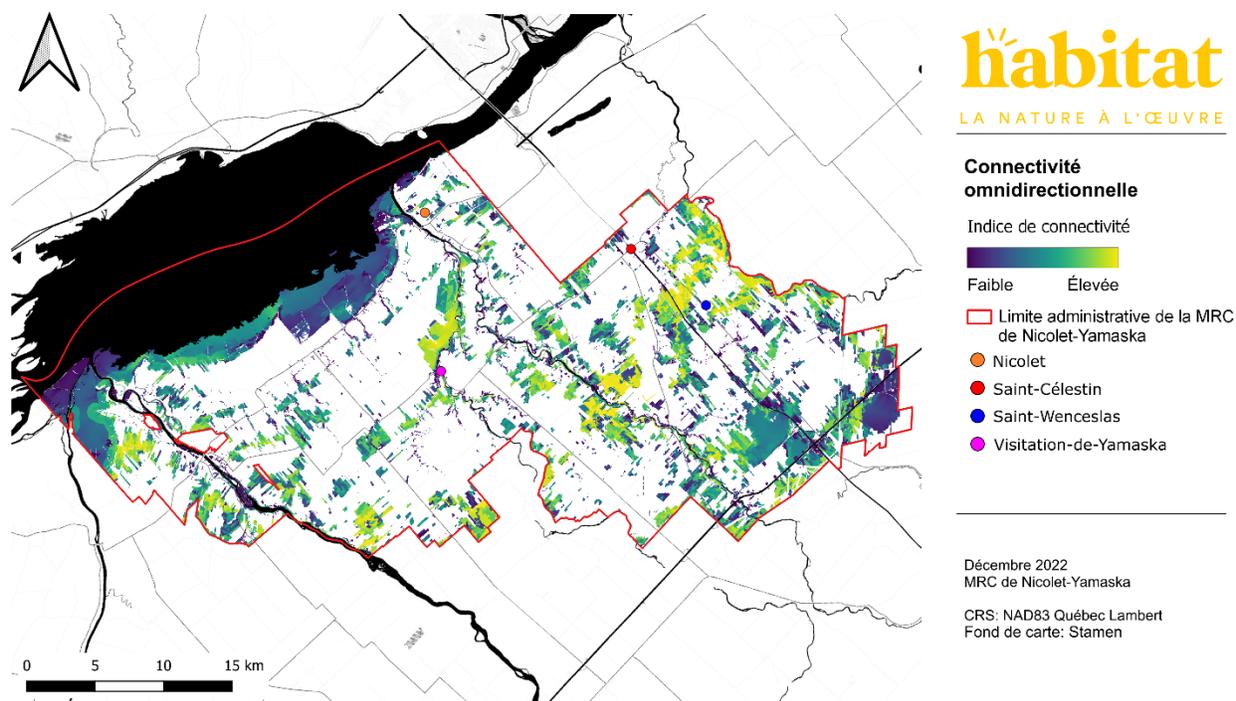
Suivant l'objectif du plan de transition écologique de la MRC visant à accroître l'intégrité et la connectivité écologique du territoire (MRC Nicolet-Yamaska 2019), les analyses de connectivité réalisées visaient à :

- Déterminer le rôle de chaque milieu naturel (forêts, milieux humides et friches) dans le déplacement des espèces fauniques à travers le territoire (analyse de [connectivité omnidirectionnelle](#)),
- Identifier les corridors écologiques au sein du territoire et la probabilité qu'ils soient empruntés par les espèces fauniques (analyse de [connectivité nœud à nœud](#)).

L'analyse de connectivité « omnidirectionnelle » évalue le déplacement des espèces étudiées à travers le territoire et dans toutes les directions, à la manière d'un flux de courant. Elle est souvent utilisée pour évaluer la connectivité à longue distance.

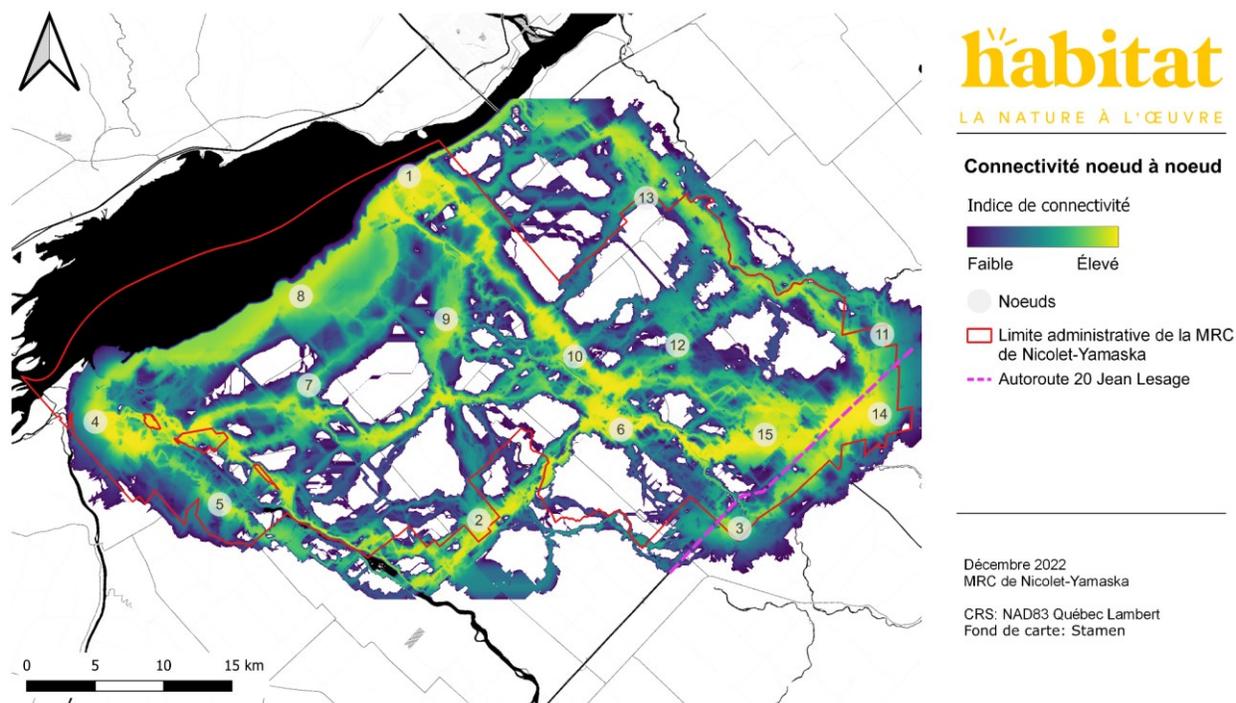
L'analyse « nœud à nœud » renseigne quant à elle sur les corridors de déplacement les plus probables entre différentes parcelles potentielles d'habitat (les « nœuds ») spécifiquement identifiées au sein du territoire. Les nœuds utilisés pour cette analyse ont été choisis sur la base des sites prioritaires pour la conservation selon l'Atlas de conservation des Basses-Terres du Saint-Laurent (Jobin et al. 2019) et en concertation avec la MRC. Cette analyse permet également d'identifier les obstacles au déplacement des espèces entre différents nœuds et donc des opportunités de restauration pour renforcer la connectivité et le réseau de déplacement des espèces. Se référer à l'annexe pour plus de détails méthodologiques. Les données géomatiques ont été transmises à la MRC pour une lecture plus détaillée des résultats.

Dans le cadre de ce projet, les analyses de connectivité écologique du territoire de la MRC se sont basées sur cinq espèces animales de référence, soit la grande musaraigne (*Blarina brevicauda*), la martre d'Amérique (*Martes americana*), la salamandre cendrée (*Plethodon cinereus*), la grenouille des bois (*Rana sylvatica*) et l'ours noir (*Ursus americanus*). Ces espèces ont été sélectionnées, car elles présentent des besoins en habitat et des cycles de vie très contrastés, permettant ainsi la représentation d'un large éventail de traits fonctionnels. L'approche se base sur le modèle des analyses réalisées par Rayfield et al. (2019) et Albert et al. (2017), identifiant les milieux naturels prioritaires pour la connectivité à l'échelle des Basses-Terres du Saint-Laurent. Dans un souci de concision, les résultats des analyses de connectivité omnidirectionnelle et nœud à nœud présentent des indices de connectivité agrégés pour les cinq espèces. Les données cartographiques spécifiques à chaque espèce ont été transmises à la MRC.



**Figure 11.** Synthèse de l'analyse de la connectivité omnidirectionnelle via les milieux naturels du territoire de la MRC Nicolet-Yamaska, pour les cinq espèces fauniques sélectionnées.

Selon l'analyse de connectivité omnidirectionnelle (*figure 11*), un certain nombre des milieux naturels au nord de la municipalité de La Visitation-de-Yamaska ressortent comme des milieux naturels d'importance pour le déplacement des espèces. Les milieux naturels au cœur du noyau urbain de la municipalité de Nicolet et à proximité directe sont également à conserver. Enfin, les milieux naturels situés entre la ville de Saint-Célestin et Saint-Wenceslas sont des maillons essentiels à la connectivité du territoire. Bien que les milieux humides bordant le lac Saint-Pierre et à l'embouchure de la rivière Yamaska participent plus modérément à la connectivité à l'échelle étudiée de la MRC, ils sont toutefois reconnus comme cruciaux pour les déplacements d'espèces à longue distance dans les Basses-Terres du Saint-Laurent (Rayfield et al. 2019).



**Figure 12.** Synthèse de l'analyse de connectivité nœud à nœud identifiant les corridors de déplacement du territoire pour les cinq espèces fauniques sélectionnées.

Selon l'analyse de connectivité nœud à nœud (*figure 12*), le territoire de la MRC superpose un réseau important de corridors propices au déplacement des espèces fauniques. Plusieurs corridors permettent ainsi de relier l'est à l'ouest et le nord au sud, ce qui offre aux espèces des tracés alternatifs. On remarque aussi l'importance et le rôle de certains milieux comme l'axe nord-est reliant les nœuds 1, 10, 6, 15, 14 et qui coïncident pour une bonne partie au tracé de la rivière Nicolet. L'analyse permet également de déceler les obstacles anthropiques empêchant les mouvements des espèces, dont la présence de l'autoroute 20 Jean Lesage qui découpe les corridors entre les nœuds 14, 15, 3 et leurs alentours.

## Recommandations

Les milieux naturels dont l'indice de connectivité est élevé (*figure 11*) sont des lieux à protéger en priorité pour assurer durablement la connectivité au niveau du paysage. Des aménagements peuvent également être mis en place dès à présent lorsque des corridors propices au déplacement sont identifiés à proximité d'espaces urbains ou lorsqu'ils traversent des routes. Les nœuds 14, 15, 3, qui jouxtent l'autoroute 20 Jean Lesage (*figure 12*), en sont un bon exemple puisqu'il s'agit de lieux de passage importants pour la faune. Une telle configuration entraîne des risques de collision entre la faune et les voitures. L'ajout d'aménagements fauniques pour favoriser la traversée des animaux en toute sécurité est ainsi recommandé pour sécuriser le tronçon tout comme l'installation de panneaux signalant la présence d'animaux.

L'élargissement de certains corridors de faible largeur, notamment entre les nœuds 6 et 2 ou 3 et 2 est également préconisé (*figure 12*). Il est d'ailleurs suggéré d'installer des pièges photographiques pour valider au préalable l'usage de ces corridors par la faune, mais aussi pour faciliter les suivis à moyen et long terme quant au déplacement des espèces à travers le territoire.

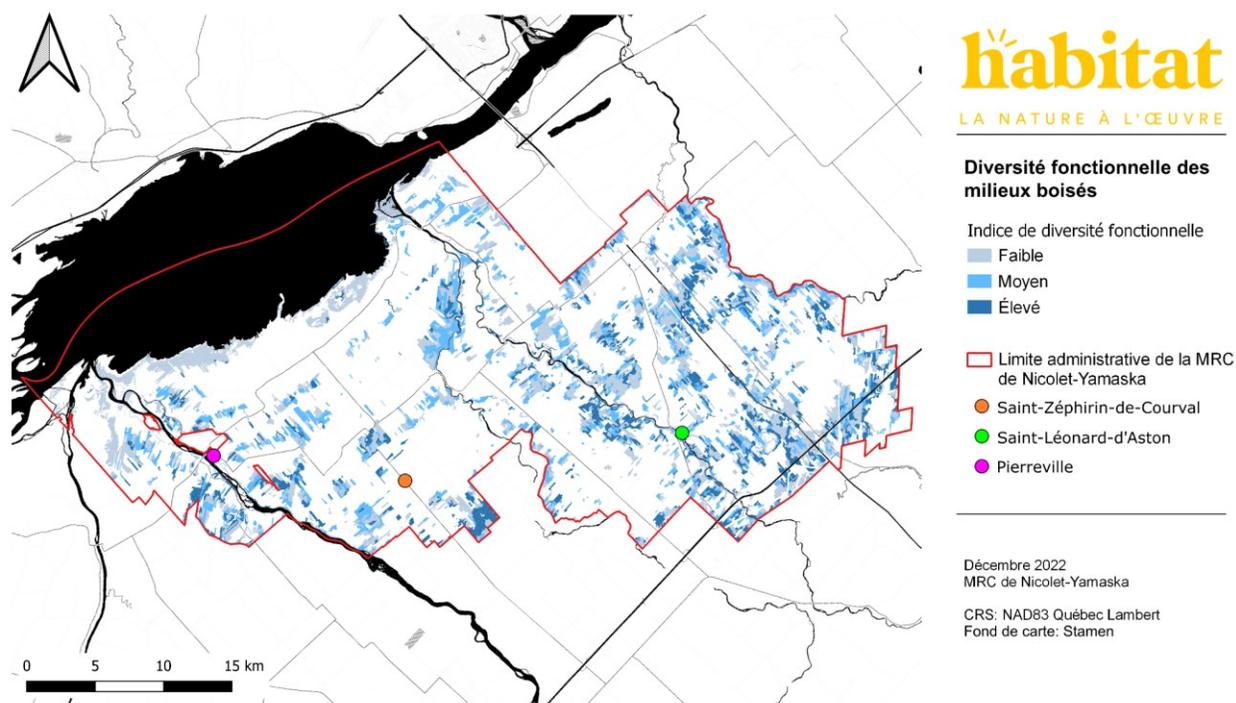
### 1.3 Vulnérabilités des milieux boisés du territoire

La vulnérabilité des milieux boisés a été évaluée sur la base de trois indicateurs complémentaires décrits dans les sections suivantes. Le premier est le niveau de diversité dite fonctionnelle des milieux boisés, considérée comme un bon indicateur de résilience. La résilience fait ici référence à la capacité de rétablissement et d'adaptation des milieux boisés à la suite d'une perturbation. Le second renseigne sur la résistance des milieux boisés de la MRC à un ensemble de menaces climatiques et biologiques. Le dernier est la probabilité des milieux naturels, dont les boisés, à être détruits suite à l'étalement urbain et agricole.

#### 1.3.1. Diversité fonctionnelle des milieux boisés

L'évaluation de la diversité fonctionnelle d'un territoire permet de déterminer si les caractéristiques biologiques (p. ex. densité du bois, tolérance à la sécheresse) des espèces d'arbres recensées sur le territoire sont suffisamment diversifiées, partant du principe que ces caractéristiques déterminent la façon dont les espèces d'arbres vont répondre et s'adapter aux conditions environnementales. Une forêt composée d'espèces d'arbres fonctionnellement différentes, ayant des tolérances et vulnérabilités diversifiées, pourra mieux s'adapter au plus grand nombre de stress possible et sera donc plus résiliente face aux changements globaux. Selon cette approche, chaque espèce d'arbre présente dans le peuplement est décrite à l'aide de ses [traits fonctionnels](#), comme sa tolérance à divers stress (p. ex. sécheresse, inondations), son milieu de croissance optimal (p. ex. ombre, drainage du sol) et d'autres critères variés (p. ex. densité du bois, taille des graines). Les espèces sont regroupées en fonction de la similitude de leurs traits fonctionnels afin de former différents groupes fonctionnels (pour un total de 6) et c'est sur la base de ces groupes sur un territoire qu'est évalué l'indice de diversité des arbres (Paquette et al. 2021; Aquilué et al. 2021). L'intérêt de diversifier les traits fonctionnels plutôt que les espèces d'arbres vise à minimiser les impacts des perturbations sur le milieu boisé, puisque plusieurs espèces d'arbres peuvent détenir le même niveau de vulnérabilité aux dites perturbations.

Comme le niveau de diversité fonctionnelle (autrement dit le nombre de groupes fonctionnels pouvant être représentés) varie naturellement d'un type de peuplement à un autre, nous avons utilisé des indices de diversité fonctionnelle différents pour chacun des trois types de peuplements (feuillu, mixte ou résineux). Les indices de diversité fonctionnelle ont été classés en trois catégories qualitatives, soit faible, moyen et élevé (figure 13). Les données géomatiques quantitatives ont pour leur part été transmises à la MRC.



**Figure 13.** Indice de diversité fonctionnelle des milieux boisés de la MRC Nicolet-Yamaska. Les milieux boisés considérés comme faiblement diversifiés sont ceux ayant reçu un indice de diversité fonctionnelle inférieur à la valeur médiane correspondant à leur composition. Les peuplements moyennement diversifiés sont ceux ayant reçu un indice compris entre la médiane (50 %) et le 75<sup>ième</sup> quantile (75 %). Les peuplements fortement diversifiés sont ceux ayant reçu un indice supérieur au 75<sup>ième</sup> quantile (75 %).

Il ressort de l'analyse une forte hétérogénéité en matière de diversité fonctionnelle. On remarque cependant que les milieux boisés le long du lac Saint-Pierre, principalement feuillus, ont en général un indice de diversité fonctionnelle faible, tout comme ceux à l'embouchure des rivières Yamaska et Saint-François. À l'inverse, certaines portions du territoire sont composées de milieux boisés à l'indice de diversité fonctionnelle élevé. C'est le cas des peuplements au sud-est de Saint-Zéphirin-de-Courval, à l'ouest de Saint-Léonard-d'Aston et au sud de Pierreville.

Plus globalement, plus de la moitié des milieux boisés de la MRC sont dominés par des espèces du groupe fonctionnel 1 alors que les groupes 3, 5 et 6 représentent ensemble moins de 10 % du total (tableau 3). Les espèces du groupe 5 sont particulièrement sous-représentées avec une proportion égale à 0,6 % du total. De façon optimale, la part de chaque groupe fonctionnel devrait être d'environ 16 %.

**Tableau 3.** Répartition des espèces composant les milieux boisés de la MRC au sein des 6 groupes fonctionnels et exemple d'espèces issues de chacun des groupes.

GROUPE FONCTIONNEL	DESCRIPTION	%	EXEMPLE D'ESPÈCES
1	Feuillu, tolérant à l'ombre, intolérant à la sécheresse ou à l'inondation (sauf érable argenté), dispersion par le vent	50,5	Érables (argenté, rouge, à sucre, de Pennsylvanie), ostryer de Virginie, ormes (rouge, d'Amérique, liège), bouleau jaune
2	Conifère, tolérant à l'ombre, intolérant à la sécheresse ou à l'inondation, dispersion par le vent	29,5	Sapin baumier, épinettes (blanche, noire, rouge, de Norvège), pin blanc, pruche, thuya
3	Feuillu, tolérant à l'ombre, tolérant à la sécheresse moyenne, intolérant à l'inondation, dispersion par les animaux	2,3	Hêtre, noyer cendré, cerisiers (tardif, noir, de Virginie, de Pennsylvanie)
4	Feuillu, intolérant à l'ombre, intolérant à la sécheresse, dispersion par le vent	11,8	Bouleaux (gris, blanc), Peupliers (baumier, deltoïde, à grandes dents, faux tremble)
5	Feuillu, tolérant à l'ombre moyenne, tolérant à la sécheresse, dispersion par les animaux	0,6	Caryers (ovale, cordiforme), micocoulier, chênes (blanc, bicolore, à gros fruits, rouge)
6	Conifère, tolérant à l'ombre et ombre moyenne, tolérant à la sécheresse, dispersion par le vent	5,3	Pins (gris, rouge, sylvestre), mélèze laricin

### Recommandations

À partir de la figure 13 les milieux boisés à forte et à faible diversité fonctionnelle sont identifiés. Si l'activité forestière est permise au sein de la MRC, il serait préférable de privilégier les coupes dans les secteurs peu diversifiés (se référer à la *figure 13*) et de profiter de ces interventions pour y planter, le cas échéant, des espèces à même d'augmenter la diversité fonctionnelle du secteur. Selon les résultats du tableau 3, il est recommandé de favoriser la plantation d'espèces issues des groupes fonctionnels 3, 5, 6 à l'échelle de la MRC afin d'augmenter le niveau de diversité fonctionnelle généralement. Les recommandations pour la plantation d'arbres à l'échelle des peuplements dépendront des espèces d'arbres présentes localement.

À l'inverse, il est suggéré de conserver les milieux boisés à forte diversité fonctionnelle. Ces derniers présentent une bonne résilience et peuvent améliorer la diversité fonctionnelle alentour en disséminant leurs semences si les conditions environnementales locales le permettent.

### 1.3.2. Vulnérabilités biologiques et climatiques

Les arbres sont sensibles ou résistants à une multitude d'éléments de nature biologiques (insectes et maladies) ou climatiques (sécheresse, gradient de température, inondation, vent violent) et chaque espèce d'arbre présente des sensibilités et résistances plus ou moins fortes. Par exemple, les érables argentés sont résistants aux inondations, mais sensibles au vent violent et à la spongieuse nord-américaine (*Lymantria dispar dispar*), un insecte défoliateur printanier.

L'évaluation de la vulnérabilité des milieux boisés du territoire repose donc sur l'analyse de la vulnérabilité des arbres aux menaces biologiques et climatiques dans un contexte de changements globaux.

L'analyse de vulnérabilité aux menaces biologiques (c.-à-d. insectes ravageurs, pathogènes et maladies) se base sur les 5 menaces qui sont décrites ci-dessous et dans le tableau 4.

- Euwallacea sp. (*Euwallacea fornicatus*)
- La spongieuse asiatique (*Lymantria dispar asiatica*)
- La spongieuse nord-américaine (*Lymantria dispar dispar*)
- Le longicorne asiatique (*Anoplophora glabripennis*)
- L'arpenreuse tardive (*Operophtera brumata*)

Le choix de ces cinq menaces se base sur la littérature scientifique (Brandt et al. 2017; Lovett et al. 2016) et parce qu'elles ont été jugées les plus préoccupantes pour le territoire de la MRC, selon leur présence actuelle ou attendue dans les prochaines décennies et en fonction des impacts potentiels sur les espèces d'arbres typiques du Québec.

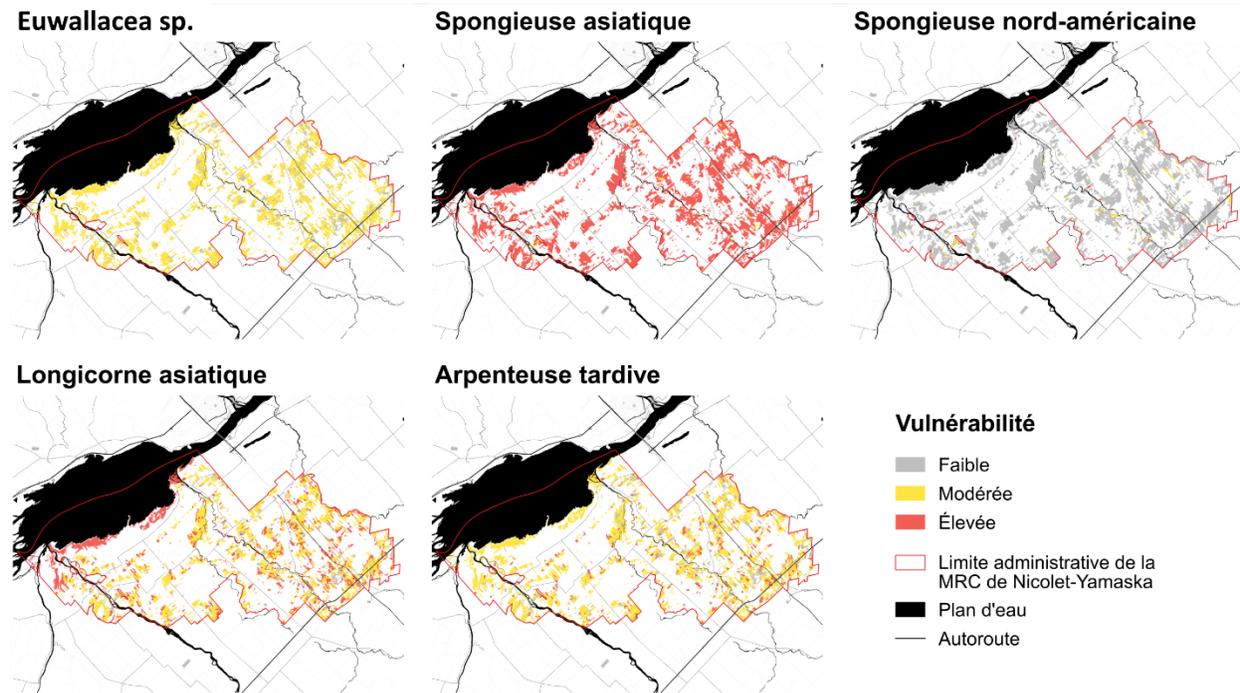
**Tableau 4.** Description des 5 menaces biologiques retenues pour l'analyse de vulnérabilité et des dommages potentiels<sup>5</sup>.

NOM COMMUN	DESCRIPTION	PRÉSENCE AU QUÉBEC
Euwallacea sp.	<p><b>Manifestation :</b> La présence de trous, de décoloration et tâches sombres sur le tronc indique la présence de l'insecte autrement très petit et difficile à observer<sup>6</sup>.</p> <p><b>Hôtes :</b> L'érable à Giguère (<i>Acer negundo</i>) est l'hôte principal, mais 100 autres espèces d'arbres, dont les érables, les chênes et les saules, peuvent servir d'hôtes à l'insecte.</p> <p><b>Impacts :</b> Creuse des galeries dans le tronc et les branches de l'arbre ce qui a pour conséquence de tuer l'arbre ou les branches infectées.</p>	Pas établi, mais présent sur la côte ouest-américaine
Spongieuse asiatique	<p><b>Manifestation :</b> Insecte défoliateur qui se nourrit des feuilles des espèces hôtes (RNC 2015).</p> <p><b>Hôtes :</b> Plus de 600 espèces de feuillus et de conifères, y compris le chêne, le bouleau, le peuplier et l'érable.</p> <p><b>Impacts :</b> Plus menaçante que la spongieuse Nord-Américaine, elle se disperse sur de plus grandes distances et à davantage d'espèces hôtes. La défoliation répétée ou combinée à d'autres facteurs de stress peut entraîner la mort.</p>	Pas établie, mais présente sur la côte ouest-canadienne
Spongieuse Nord-Américaine	<p><b>Manifestation :</b> Masse d'œufs d'aspect poilu sur le tronc et les branches, puis de chenilles (RNC 2015).</p> <p><b>Hôtes :</b> Les chênes sont l'hôte principale, mais 150 autres espèces d'arbres, majoritairement feuillus, peuvent servir d'hôtes à l'insecte.</p> <p><b>Impacts :</b> Défoliation des arbres. Après quatre ans de défoliation consécutive, les arbres peuvent mourir. La défoliation affaiblit également les arbres alors davantage vulnérables à d'autres menaces.</p>	Établie
Longicorne asiatique	<p><b>Manifestation :</b> Insecte qui attaque le bois et l'écorce des arbres infestés, affectant le mécanisme de transport de la sève (RNC 2015).</p> <p><b>Hôtes :</b> Plusieurs espèces d'arbres dont les érables en particulier, les bouleaux, les peupliers et d'autres feuillus.</p> <p><b>Impacts :</b> Provoque la mort des arbres affectés. Pourrait entraîner des dégâts majeurs dans les érablières et les peuplements de feuillus.</p>	Pas établi, mais éradiqué après éclosion en Ontario
Arpenteuse tardive	<p><b>Manifestation :</b> Insecte défoliateur qui dépose ses œufs le long du tronc, dans le lichen ou les crevasses de l'écorce. Des trous de petite taille dans les feuilles peuvent laisser soupçonner la présence de jeunes larves, mais l'observation des chenilles de couleur vert clair et qui se déplacent en arquant le dos comme le font toutes les arpenteuses est quasiment nécessaire pour confirmer le diagnostic (RNC 2015).</p> <p><b>Hôtes :</b> Plusieurs feuillus et en particulier les chênes et les pommiers.</p> <p><b>Impacts :</b> Défoliation des arbres. Après quatre ans de défoliation consécutive, les arbres peuvent mourir.</p>	Pas établie, mais présente au Nouveau-Brunswick, Nouvelle-Écosse et Île-du-Prince-Édouard

<sup>5</sup> Ces menaces ont été choisies en concertation avec le professeur et ingénieur forestier Christian Messier.

<sup>6</sup> <https://www.cabi.org/isc/datasheet/18360453>

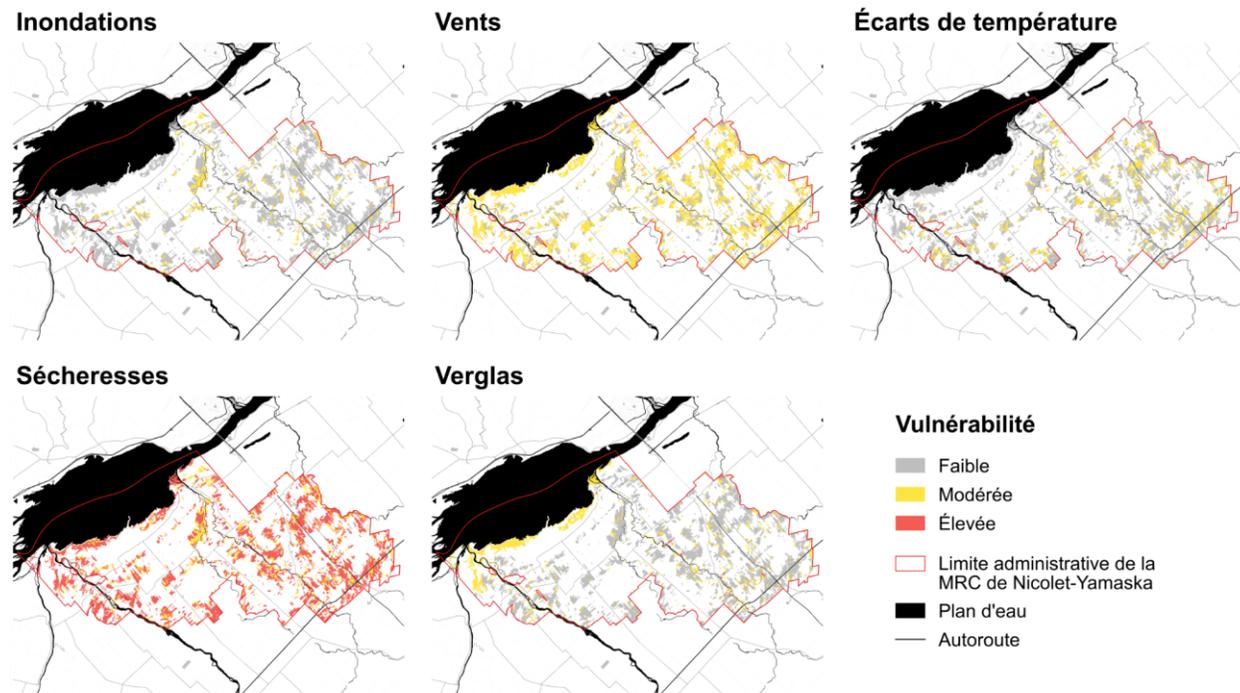
La figure 14 fournit un aperçu des indices de vulnérabilité des milieux forestiers à ces cinq menaces biologiques.



**Figure 14.** Vulnérabilité des milieux boisés de la MRC face aux cinq menaces biologiques jugées les plus préoccupantes pour la région. Les milieux boisés affectés à moins de 25 % de leur surface terrière sont considérés peu vulnérables (gris), ceux affectés de 25 à 75 % sont considérés pouvoir subir des impacts modérés (jaune) et ceux affectés à plus de 75 % sont considérés pouvoir subir des impacts élevés (rouge).

Les impacts potentiels du scolyte du bois, qui s'attaque principalement aux feuillus, sont globalement évalués comme modérés pour l'ensemble du territoire et aucune tendance locale ne se dessine réellement. L'insecte n'est pas encore établi au Québec, seulement sur la côte ouest-américaine. À l'opposé, l'arrivée de la spongieuse asiatique entraînerait des conséquences dramatiques pour l'ensemble des milieux boisés du territoire puisque l'insecte se nourrit d'une multitude d'espèces forestières. Comme pour le scolyte, l'insecte est pour l'instant seulement présent sur la côte ouest-américaine à l'échelle du continent nord-américain. Les impacts de la spongieuse Nord-Américaine, insecte déjà présent sur le territoire, sont pour leur part beaucoup plus limités. Ils sont circonscrits aux milieux boisés au centre et à l'est de la MRC, principalement dans les municipalités de Saint-Léonard-d'Aston, Sainte-Eulalie et Saint-Wenceslas. Dans le cas de l'apparition du longicorne asiatique, les milieux boisés du littoral du lac Saint-Pierre et à l'embouchure des rivières Yamaska et Saint-François sont particulièrement à risque de dépérissement. Le reste du territoire est globalement à risque modéré. Enfin, les impacts de l'arpenteuse tardive, insecte établi dans les provinces atlantiques, sont similaires à ceux du scolyte. L'essentiel des milieux boisés est ainsi considéré comme modérément à risque.

L'analyse de vulnérabilité aux menaces climatiques s'est quant à elle basée sur les 5 menaces les plus préoccupantes pour la région<sup>7</sup>, soit les inondations, le vent violent, les écarts de température, la sécheresse et le verglas (figure 15).



**Figure 15.** Vulnérabilité des milieux boisés de la MRC face aux cinq menaces climatiques jugées les plus préoccupantes pour la région. Les milieux boisés affectés à moins de 25 % de leur surface terrière sont considérés peu vulnérables (gris), ceux affectés de 25 à 75 % sont considérés pouvoir subir des impacts modérés (jaune) et ceux affectés à plus de 75 % sont considérés pouvoir subir des impacts élevés (rouge).

Selon l'analyse réalisée, la majorité des milieux boisés de la MRC sont fortement vulnérables aux épisodes de sécheresse. Cet aléa représente la menace la plus importante parmi les 5 étudiées. Le vent représente la seconde perturbation climatique entraînant le plus de dégâts potentiels, suivie par les écarts de température, le verglas et les inondations. Dans le cas du vent, une bonne partie du territoire est modérément vulnérable. Les milieux boisés les plus à risque se trouvent dans le vaste complexe de milieux humides à l'ouest de la municipalité de Sainte-Eulalie. Les écarts de températures affectent quant à eux peu le territoire. La majorité des milieux boisés sont en effet faiblement vulnérables à cet aléa. Concernant la vulnérabilité au verglas, les secteurs les plus vulnérables se situent le long du littoral du lac Saint-Pierre. Enfin, la vulnérabilité aux inondations est faible, mis à part pour les milieux boisés le long des rivières Nicolet Sud-Ouest et Nicolet, au niveau du centre urbain de Saint-Léonard-d'Aston, considérés comme modérément vulnérables.

<sup>7</sup> Basée sur les travaux de Matthews et al. (2011). Les détails sont fournis en annexe.

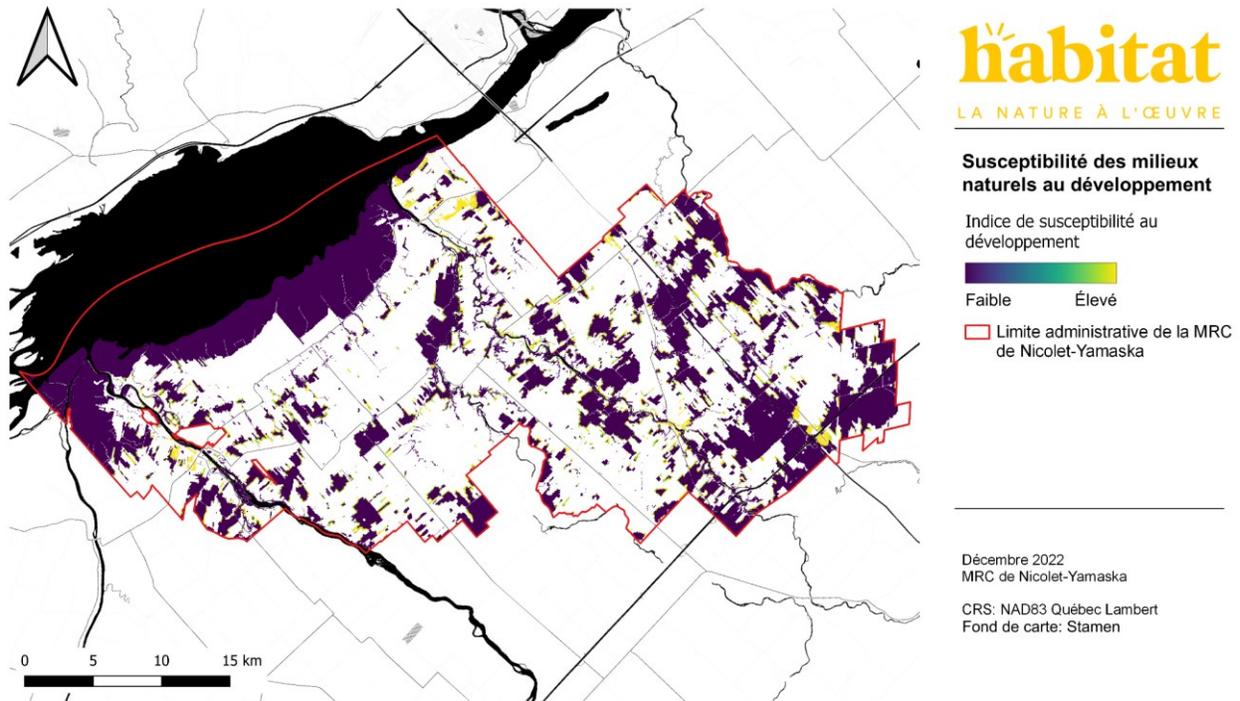
## Recommandations

Ces résultats éclairent quant aux principaux risques encourus par les milieux boisés du territoire et identifient les zones de forte vulnérabilité qui nécessiteraient davantage de suivis à l'avenir. Il est toutefois pertinent de noter qu'il existe beaucoup d'incertitudes autour des conditions climatiques futures, rendant peu prévisibles les risques biologiques et climatiques potentiels. Il est par exemple probable que les changements climatiques aient des incidences sur la phénologie des insectes et les interactions trophiques entre les arbres hôtes, les insectes et leurs ennemis naturels (Pureswaran et al. 2015). Le risque de désynchronisation des réponses des populations, qu'il s'agisse d'un lien proies/prédateurs, hôtes/parasites ou d'espèces mutualistes a notamment été étudié (Bellard et al. 2012). Des facteurs de stress biologiques et climatiques pourraient également entrer en interaction, comme c'est le cas de la sécheresse et de la maladie corticale du hêtre, menaçant davantage les milieux boisés (McCullough et al. 2005). Ainsi, face aux incertitudes futures, il est recommandé d'opter pour l'augmentation de la diversité fonctionnelle des milieux boisés, en particulier dans les zones vulnérables à un ensemble de menaces biologiques et climatiques.

### 1.3.3. Urbanisation et intensification agricole

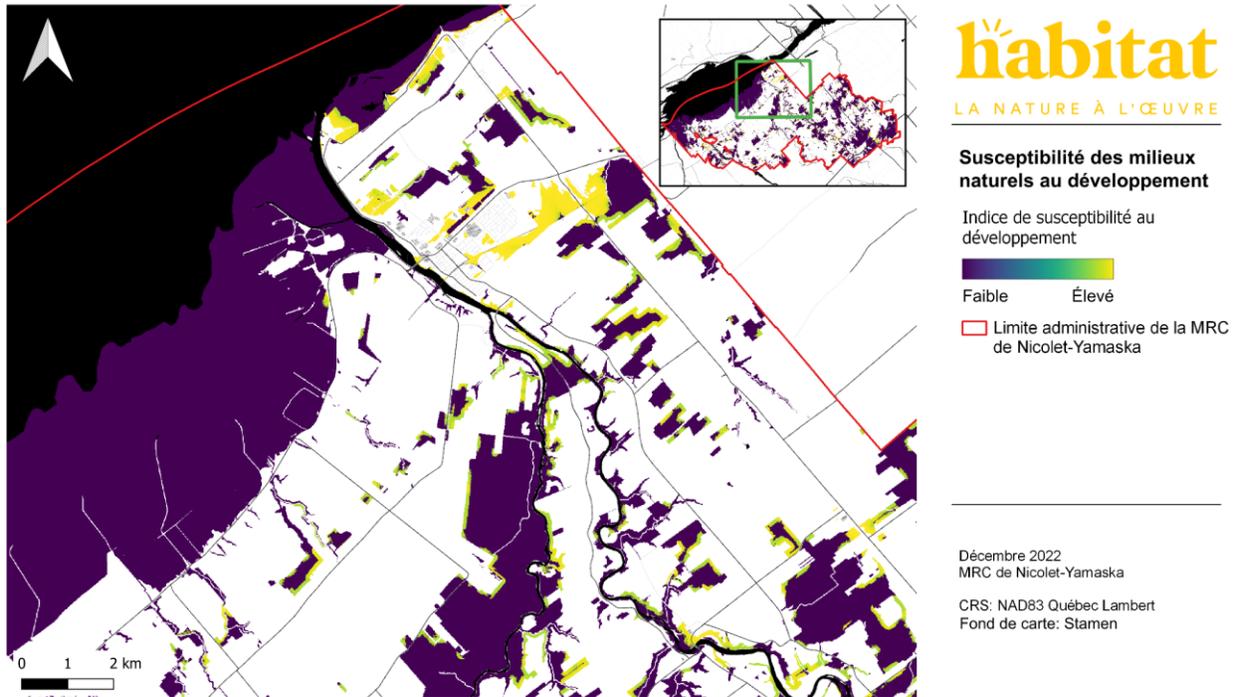
Au sud du Québec, on assiste depuis des décennies à une perte des milieux naturels au profit de l'étalement urbain (Dupras & Alam 2015), ainsi qu'à l'intensification de l'agriculture avec une transformation des cultures agricoles pérennes en cultures annuelles (Bélanger & Grenier 2002; Jobin et al. 2010). Ces changements d'occupation des sols ont un impact profond pour la biodiversité et plus largement les services écosystémiques offerts par la nature.

Habitat a développé une méthodologie pour évaluer les zones les plus sensibles aux pressions anthropiques et à l'intensification agricole (détails en annexe; Habitat 2020; Rayfield et al. 2021). Basée sur les taux de transition historiques observés dans la MRC pour la période 2000-2010 (AAFC 2015), cette approche permet de prédire les changements d'occupation des sols et leur localisation à l'horizon 2070, tout en suivant un ensemble de règles pour spatialiser adéquatement les nouvelles zones d'urbanisation. Elle permet ainsi de proposer des transitions paysagères réalistes (Apex RMS 2022). À titre d'exemple, les nouvelles zones d'urbanisation sont toujours à proximité des noyaux urbains actuels. L'intégralité des milieux naturels protégés actuels (p. ex. milieux humides) demeure inchangée en 2070. Les friches se transforment progressivement en milieux forestiers selon la succession naturelle. Les milieux naturels peuvent être remplacés par des milieux agricoles contigus. Les types de cultures des milieux agricoles nouvellement créés sont similaires aux cultures avoisinantes.



**Figure 16.** Indice de susceptibilité des milieux naturels aux pressions anthropiques et à l’intensification agricole sur le territoire de la MRC Nicolet-Yamaska.

On observe que les secteurs où les milieux naturels sont les plus à risque de disparaître au profit de milieux urbains ou agricoles sont ceux situés dans les municipalités de Nicolet, Saint-François-du-Lac, Sainte-Eulalie, Saint-Léonard-d’Aston (*figure 16*). Le cas de Nicolet est peut-être le plus préoccupant puisque l’essentiel des milieux naturels non protégés du territoire municipal serait perdu du fait du développement (*figure 17*), nuisant également à un corridor de déplacement identifié au niveau régional (*figure 12*).



**Figure 17.** Indice de susceptibilité des milieux naturels aux pressions anthropiques et à l'intensification agricole pour la municipalité de Nicolet.

### Recommandations

Les milieux naturels les plus susceptibles au développement sont majoritairement ceux à proximité de milieux urbains existants. Or, les milieux naturels contigus aux milieux urbains bénéficient avant tout aux populations locales. Ces milieux améliorent entre autres la qualité de l'air, réduisent le bruit, régulent les températures et limitent le risque d'inondation. Les secteurs sensibles au bruit (p. ex. proche des grands axes routiers), aux inondations ou reconnus comme des îlots de chaleur se doivent par exemple de préserver ou restaurer les milieux naturels locaux. La sauvegarde des milieux naturels passe également par la conscientisation de la population quant à la valeur et au rôle des milieux naturels. Enfin, le cadre législatif offre de puissants outils pour protéger les milieux naturels (p. ex. schéma d'aménagement et de développement de la MRC, plan d'urbanisme des municipalités de la MRC, zonage, création d'aire protégée ou servitude de conservation)<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> <https://connectiviteecologique.com/municipalite#urbanisme>

## 2. QUELS MILIEUX NATURELS CONSERVER EN PRIORITÉ ? L'APPROCHE MULTICRITÈRE COMME SOLUTION OPTIMALE

Sur la base du portrait écologique actuel du territoire de la MRC et notamment de la contribution des milieux naturels en termes de services et de connectivité écologique, la prochaine étape consiste à identifier ceux qui devraient être conservés en priorité pour assurer le maintien durable d'un maximum des bénéfiques sur le territoire. L'approche mise de l'avant, appelée « priorisation multicritère », intègre plusieurs critères caractérisant le territoire dans l'optique de hiérarchiser les différents milieux naturels. Elle est souvent utilisée comme outil d'aide à la décision.

Dans le contexte de ce mandat, l'analyse multicritère a été réalisée afin d'identifier les milieux d'importance à la fois pour le soutien de la biodiversité, les services écosystémiques et le maintien de la connectivité entre les parcelles d'habitat de haute qualité. Au total, en fonction du type de naturel analysé, nous avons intégré jusqu'à 12 critères issus du portrait du territoire dans l'analyse de priorisation (*tableau 5*). Ceux jugés trop redondants (p. ex. la recharge des nappes souterraines et le ruissellement des eaux en surface) ou ne couvrant pas la majorité des milieux naturels du territoire (p. ex. exportation annuelle d'azote et de phosphore, dépendance des milieux agricoles à la pollinisation) n'ont pas été retenus. Ces critères ont en revanche été utilisés, à des degrés divers, dans la comparaison des scénarios de changement d'utilisation des sols (section 4).

**Tableau 5.** Description des critères intégrés à l'analyse de priorisation multicritère afin de hiérarchiser les milieux naturels à conserver en priorité, et de leur poids respectif dans l'analyse. Le tableau indique les types de milieux naturels pour lesquels les critères ont été pris en compte<sup>9</sup> (MB : milieux boisés, MH : milieux humides, MF : milieux en friche).

CRITÈRE	POIDS DU CRITÈRE*	DESCRIPTION DE VALEUR DE PRIORISATION ÉLEVÉE	MB	MH	MF
Contrôle de l'érosion	1	Capacité à retenir les sédiments élevé	x	x	x
Recharge des eaux souterraines	1	Zone participant le plus à la recharge des eaux souterraines	x		x
Présence de pollinisateurs	1	Contexte paysager propice pour les pollinisateurs sauvages et la pollinisation des cultures par ceux-ci	x	x	x
Stockage du carbone dans la biomasse	0,5	Stockage de carbone dans la biomasse élevé	x	x	x
Stockage du carbone dans les sols	0,5	Stockage de carbone du sol élevé	x	x	x
Indice de connectivité omnidirectionnelle	0,5	Zone de forte valeur de connectivité omnidirectionnelle	x	x	x

<sup>9</sup> Certains critères n'ont pas été intégrés à la priorisation en raison d'un manque de données (milieu naturel prioritaire selon Jobin et al. 2019) ou de limitations méthodologiques (recharge des nappes souterraines).

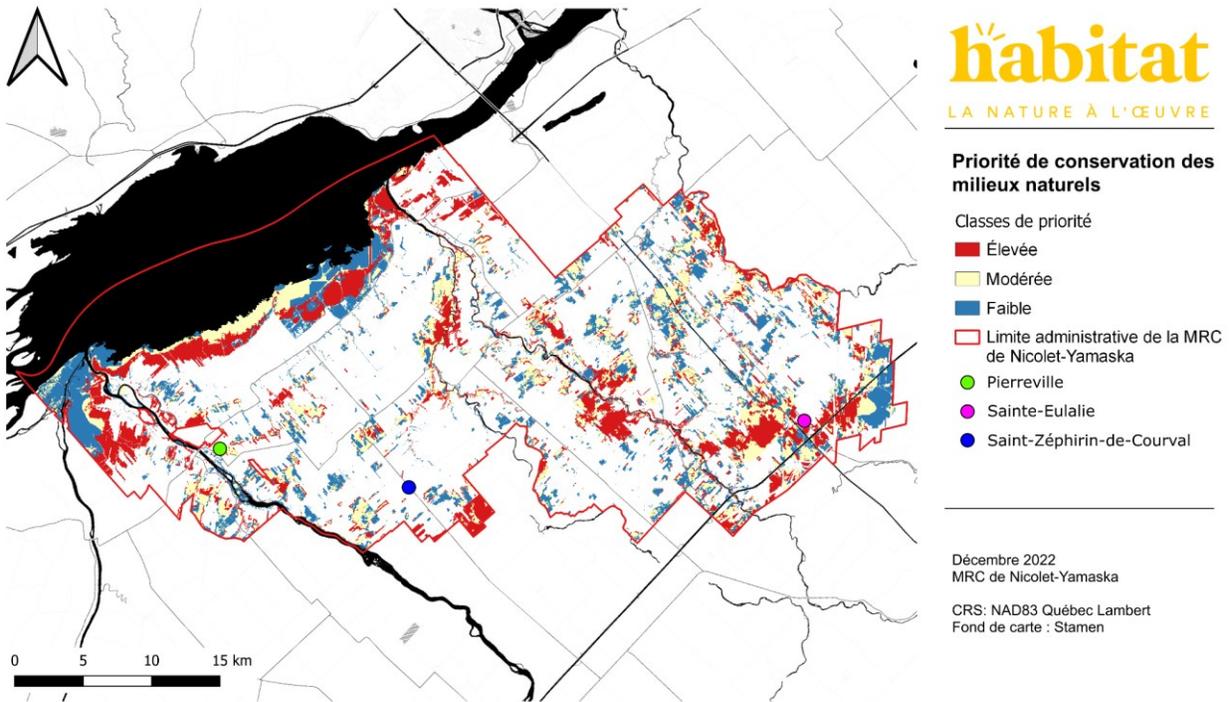
CRITÈRE	POIDS DU CRITÈRE*	DESCRIPTION DE VALEUR DE PRIORISATION ÉLEVÉE	MB	MH	MF
Connectivité nœud à nœud	0,5	Zone de forte valeur de connectivité nœud à nœud	x	x	x
Milieu naturel prioritaire selon Jobin et al., (2019)	1	Zone de conservation prioritaire selon l'Atlas des Basses-Terres du Saint-Laurent	x	x	
Diversité fonctionnelle	1	Indice de diversité fonctionnelle des peuplements forestiers élevé	x		
Vulnérabilités biologiques	0,5	Vulnérabilité aux menaces biologiques faible	x		
Vulnérabilités climatiques	0,5	Vulnérabilité aux menaces climatiques faible	x		
Susceptibilité à l'urbanisation et à l'intensification agricole	1	Susceptibilité à l'urbanisation et à l'intensification agricole élevée	x	x	x

\* Pour ne pas déséquilibrer l'analyse au profit d'un critère particulier, les critères se rapportant au même service ont reçu un poids qui au total correspond à 1, tels que le « stockage de carbone de la biomasse » et le « stockage de carbone des sols », les deux critères de vulnérabilité climatiques et biologiques, ou la connectivité.

Pour s'assurer de ne pas défavoriser les milieux naturels selon leur nature (milieux forestiers, milieux humides et en friches) et considérant aussi que certains critères ne s'appliquent pas à l'ensemble des milieux, l'analyse multicritère a été réalisée séparément pour chaque type de milieux naturels. Les résultats des trois analyses multicritères ont ensuite été combinés sur une même figure (*figure 18*). Le niveau de priorité y est présenté selon trois classes de priorité pour la conservation (faible, modérée, élevée).

Les milieux naturels à haute valeur de conservation sont ceux qui contribuent le plus à la fois aux services écosystémiques évalués (contrôle de l'érosion, bilan hydrique, pollinisation, stockage du carbone), à la connectivité écologique du paysage et qui ont aussi un faible niveau de vulnérabilité face aux changements globaux. Ils peuvent ainsi être considérés comme des milieux offrant un large éventail de bénéfices et dont la perte serait fortement dommageable à l'intégrité écologique du territoire et à sa résilience. Plusieurs patrons spatiaux émergent quant à la répartition de ces milieux naturels à l'échelle de la MRC (*figure 18*). On remarque d'abord que les milieux naturels le long des rivières Nicolet et Nicolet-Ouest sont généralement avec une priorité élevée de conservation. Leur rôle dans le contrôle de l'érosion le long de ces rivières et dans le maintien de la connectivité explique en grande partie ces résultats (*figures 3 et 13*). Les milieux naturels situés à proximité de Sainte-Eulalie, principalement des tourbières,

se démarquent par leur contribution au stockage de carbone, à la pollinisation et à la connectivité. Enfin, les vastes espaces naturels à l'ouest de Pierreville et au sud-est de Saint-Zéphirin-de-Courval constituent des territoires encore peu fragmentés qui devraient être maintenus intègres connaissant la nécessité de conserver de grands milieux naturels dans les BTSL (p. ex. Bélanger & Grenier 2002; Latendresse et al. 2008). Finalement, la plupart des milieux naturels du territoire de la municipalité de Nicolet ont aussi reçu une haute valeur de conservation considérant leur rôle dans le réseau de déplacement des espèces fauniques de la région (figure 13), mais notamment leur très forte susceptibilité au développement (figure 17).



**Figure 18.** Priorisation multicritère des milieux naturels de la MRC Nicolet-Yamaska, selon leur contribution en services écosystémiques et à la connectivité écologique du territoire et leur niveau de vulnérabilité.

Les milieux ayant reçu une priorité faible de conservation sont répartis dans l'ensemble du territoire. Ils sont généralement caractérisés par une faible diversité fonctionnelle, une forte vulnérabilité face aux menaces biologiques et climatiques et ils contribuent dans une moindre mesure à la connectivité et aux services évalués dans le cadre de cette étude. Cela étant dit, ces milieux offrent probablement une multitude d'autres bénéfices au sein du territoire (ex. habitat pour les oiseaux champêtres, activités récréatives), et ils offrent aussi un potentiel de restauration important.

### 3. RÉFLÉCHIR AUJOURD'HUI POUR L'AMÉNAGEMENT TERRITORIAL DE DEMAIN

---

La caractérisation écologique actuelle du territoire de la MRC Nicolet-Yamaska et l'identification des milieux naturels à forte et faible valeur offrent des pistes de réflexion pour aménager le territoire de demain. En complément à ces analyses, trois potentiels scénarios d'aménagement ont été développés. Les sections suivantes décrivent et comparent ces scénarios en termes de valeur écologique.

#### 3.1 Trois stratégies d'aménagement du territoire

---

Trois scénarios d'aménagement du territoire ont été créés et modélisés pour estimer la valeur écologique d'un ensemble de SÉ à l'horizon 2070 :

- Scénario 1 : *Statu quo*
- Scénario 2 : *Compensation*
- Scénario 3 : *Renaturalisation*

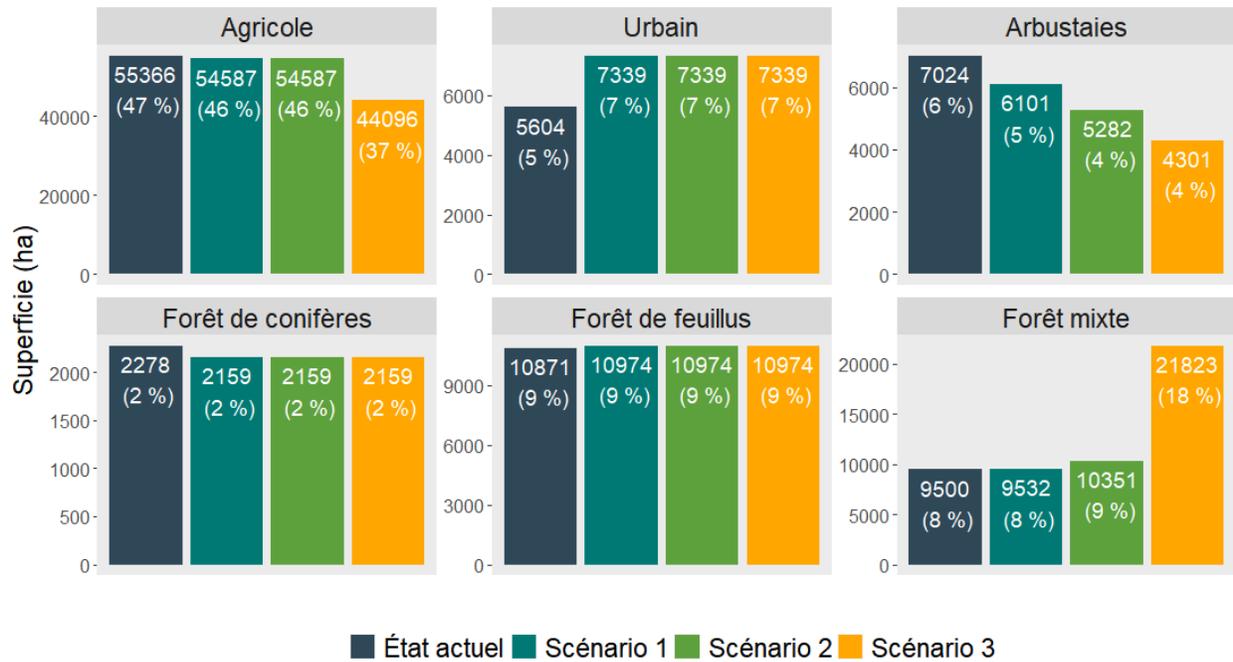
Ces scénarios se basent sur des changements d'occupation des sols à l'échelle de la MRC (p. ex. conversion d'un milieu forestier en milieu urbain) pour déterminer les bénéfices ou les pertes en termes de SÉ. Les scénarios sont intentionnellement très différents les uns des autres, car ils poursuivent des objectifs différents. Ils ont toutefois une base commune : la localisation des milieux urbains et agricoles en 2070 correspond dans tous les cas aux résultats de la section 2.3.3 (urbanisation et intensification agricole). Pour chacun des scénarios, les analyses effectuées dans les sections 2.1 (services écosystémiques) et 2.2 (connectivité) ont été réitérées selon une carte d'occupation des sols de la MRC propre à chacun des scénarios.

Le scénario **Statu quo** correspond à un développement territorial suivant les tendances de développement historiques de la MRC. Dans ce scénario, la proportion des milieux naturels baisse considérablement, au profit des milieux urbains. Ce scénario n'a pas d'objectif écologique particulier, il sert plutôt de référence et vise à comparer la plus-value écologique qu'offrent les deux autres scénarios.

Le scénario **Compensation** vise à compenser la perte de superficie attribuée à l'urbanisation par la restauration de friches afin qu'elles soient reconverties en milieux forestiers. Ce scénario s'accorde avec l'objectif du maintien des superficies de milieux naturels du Plan de transition écologique de la MRC (MRC Nicolet-Yamaska 2019) et vise à augmenter le stockage du carbone sur le territoire et améliorer le bilan hydrique. Ainsi, si 10 ha de milieux naturels sont détruits par l'urbanisation entre aujourd'hui et 2070, 10 ha de friches seront restaurés. Le choix des friches à restaurer a été guidé par l'analyse de priorisation réalisée à la section 3. Dans la simulation, la restauration des friches est réalisée via leur conversion en milieux boisés mixtes.

Le scénario **Renaturalisation** propose d'aller plus loin que la compensation des superficies perdues consécutive à l'urbanisation. Ce scénario propose d'augmenter la part des milieux naturels sur le territoire de la MRC pour que ceux-ci représentent 45 % des superficies totales. Comme dans le cas du scénario *Compensation*, les sites à restaurer ont été choisis pour maximiser les bénéfices écologiques, avec une emphase portée sur l'accroissement de la connectivité écologique entre les milieux naturels de la MRC. Les sites à restaurer sont en premier lieu des friches. Toutefois, leur superficie totale n'étant pas suffisante pour atteindre l'objectif de 45 % de milieux naturels, des sites agricoles ont également été convertis en milieux forestiers. Le choix des milieux agricoles à convertir s'est fait à l'aide d'une analyse de priorisation multicritère selon les critères suivants : bilan hydrique, topographie (pente), qualité des sols et connectivité. Les milieux agricoles présentant des pentes importantes, où la qualité des sols est faible, le ruissellement de surface est élevé et se trouvant dans un corridor de connectivité sont ainsi sélectionnés en priorité pour être boisés.

La figure ci-dessous présente les superficies et pourcentages d'occupation des sols au temps actuel (2020) et selon les trois scénarios (2070) (figure 19).



**Figure 19.** Comparaison des superficies et proportions des différents types d'occupation des sols pour chacun des scénarios de développement de la MRC ainsi que pour l'état actuel du territoire. Les milieux humides et aquatiques ne sont pas affichés parce qu'il n'y a pas de changements d'un scénario à l'autre.

À noter que la création de ces scénarios présente certaines limites méthodologiques. D'abord, chacun des scénarios modifie l'occupation des sols du territoire de la MRC, mais pas de la région alentour. Or, lors de l'évaluation des services écosystémiques liés à l'eau, en l'occurrence l'érosion, les nutriments et le bilan hydrique, les analyses sont réalisées à l'échelle des bassins versants. Il y a donc un décalage entre la carte d'occupation des sols mis à jour pour le territoire de la MRC, et non mise à jour pour le reste des bassins versants alentour. Ainsi, les résultats de ces analyses sous-estiment le changement en valeurs totales puisque seul le territoire de la MRC a été modifié.

Ensuite, le facteur temps est pris en compte dans les analyses de connectivité, mais pas pour l'évaluation des services écosystémiques, car les flux de travail de ces analyses sont différents. En d'autres termes, le vieillissement des écosystèmes est simulé pour les analyses de connectivité, mais pas pour celles des services. Ceci implique par exemple que les taux de carbone stocké n'évoluent pas entre aujourd'hui et 2070, les valeurs utilisées sont des moyennes spécifiques à chaque type d'occupation des sols. Une parcelle aujourd'hui forestière aura le même stock de carbone en 2070. En revanche, lorsqu'on s'intéresse à la connectivité, une forêt considérée jeune aujourd'hui sera plus mature en 2070, ce qui implique une valeur d'habitat différente.

Enfin, les données climatiques (précipitation, évapotranspiration) utilisées pour modéliser les services écosystémiques liés à l'écoulement de l'eau sur le territoire (érosion, nutriments, bilan hydrique) en 2070 sont identiques à celles du portrait actuel. Il existe de nombreux jeux de données climatiques prédictifs

issus de différents modèles climatiques globaux ou régionaux ayant chacune des trajectoires climatiques variables. Choisir un modèle parmi l'ensemble sortait du cadre du mandat actuel et aurait complexifié la lecture des résultats, et d'autant plus que l'objectif était de comparer spécifiquement les changements d'occupation des sols à travers trois stratégies d'aménagement.

### **3.2 Comparaison des portraits écologiques présents et futurs**

---

À partir des cartes d'occupation des sols propres à chacun des trois scénarios, nous avons répété les analyses d'évaluation des services écosystémiques retenus pour le portrait et celles de connectivité écologique au sein du territoire. Afin de faciliter la comparaison des scénarios entre eux et avec le portrait actuel, deux nouvelles variables ont été utilisées, soit le nombre total de pollinisateurs sauvages sur l'ensemble du territoire (*tableau 6*) et l'indice de capacité des métapopulations (Hanski & Ovaskainen 2000) (*tableau 7*). Le nombre total de pollinisateurs sur correspond à la somme des cinq pollinisateurs utilisés pour l'analyse. L'indice de capacité des métapopulations fait référence à la capacité d'un territoire à accueillir une population animale de façon stable et durable, en se basant sur la taille des parcelles d'habitat et la distance qui les sépare. Cet indice est complémentaire à l'indicateur de connectivité (superficie des corridors de déplacement), car la méthodologie employée pour ce dernier utilise le tracé des corridors du portrait actuel comme référence et ne comptabilise pas les superficies éventuellement gagnées par de nouveaux corridors sur le territoire.

Les résultats pour ces trois scénarios d'aménagement ont été transmis à la MRC sous forme de données géomatiques. Les tableaux 6 et 7 ci-dessous présentent la synthèse des valeurs biophysiques obtenues pour les trois scénarios et le portrait actuel du territoire.

**Tableau 6.** Comparaison de la contribution en services écosystémiques pour chacun des trois scénarios d'aménagement par rapport au portrait actuel du territoire de la MRC. La couleur des valeurs indique une amélioration (en vert), une stagnation (en orange) ou une perte (en rouge) de valeur comparativement aux valeurs du portrait actuel.

SERVICE ÉCOSYSTÉMIQUE ÉVALUÉ	PORTRAIT ACTUEL	SCÉNARIO 1 STATU QUO	SCÉNARIO 2 COMPENSATION	SCÉNARIO 3 RENATURALISATION
Exportation sédiments t/an (% comparé au portrait actuel)	20,882	22,924 (+9,8)	21,646 (+3,7)	17,525 (-16,1)
Exportation azote kg/an (% comparé au portrait actuel)	900,419	887,401 (-1,5)	887,714 (-1,4)	729,110 (-19,0)
Exportation phosphore kg/an (% comparé au portrait actuel)	1,420	1,718 (+21,0)	1,718 (+21,0)	1,522 (+7,2)
Abondance relative des pollinisateurs dans les milieux agricoles (% comparé au portrait actuel)	715,1	734,3 (+2,7)	724,2 (+1,3)	722,2 (+1,0)
Nombre total de pollinisateurs sauvages sur l'ensemble du territoire (% comparé au portrait actuel)	1 413 351	1 435 005 (+1,5)	1 404 959 (-0,6)	1 401 291 (-0,9)
Bilan hydrique Ruissellement de surface <sup>10</sup> (% comparé au portrait actuel)		(+1,2)	(+1,1)	(-10,1)
Stockage total du carbone tC (% comparé au portrait actuel)	1 193 34 3732	1 184 379 580 (-0,75)	1 191 241 374 (-0,18)	1 194 089 424 (+0,06)

<sup>10</sup> Cet indicateur indique la variation relative de la quantité d'eau ruisselant en surface. Une valeur positive implique une augmentation du ruissellement et par conséquent plus d'érosion et une augmentation du risque de crue subite. Une valeur négative signifie une réduction du ruissellement et donc une meilleure infiltration de l'eau dans le sol, rechargeant alors la nappe souterraine.

**Tableau 7.** Comparaison des indicateurs de connectivité pour les différents scénarios d'aménagement par rapport au portrait actuel du territoire. La couleur des valeurs indique une amélioration (en vert), une stagnation (en orange) ou une perte (en rouge) de valeur comparativement aux valeurs du portrait actuel.

	SCÉNARIO 1 STATU QUO	SCÉNARIO 2 COMPENSATION	SCÉNARIO 3 RENATURALISATION
<b>Différence en superficie des corridors de déplacement (%)<sup>11</sup></b>			
Grande musaraigne	+7 %	+9 %	+43 %
Martre d'Amérique	-49 %	-44 %	+11 %
Salamandre cendrée	-36 %	-36 %	+22 %
Ours noir	-2 %	-1 %	+9 %
Grenouille des bois	-37 %	-32 %	-41 %
<b>Indice de capacité des métapopulations*</b>			
Grande musaraigne	1,2	1,2	3
(% comparé au portrait actuel)	(+20)	(+20)	(+200)
Martre d'Amérique	1,7	1,7	9,8
(% comparé au portrait actuel)	(+70)	(+70)	(+880)
Salamandre cendrée	1,0	1,0	1,4
(% comparé au portrait actuel)	(0)	(0)	(+40)
Ours noir	1,4	1,4	1,7
(% comparé au portrait actuel)	(+40)	(+40)	(+70)
Grenouille des bois	0,9	0,9	2,2
(% comparé au portrait actuel)	(-10)	(-10)	(+120)

\* Une valeur inférieure à 1 signifie une baisse de la capacité du territoire à supporter la faune. Une valeur supérieure à 1 indique la possibilité du territoire à accueillir davantage d'individus.

### 3.2.1. Bilan du scénario 1, Statu quo

L'approvisionnement en services écosystémiques de ce scénario est plus bas que celui du portrait actuel, excepté pour la quantité d'azote exporté vers les milieux aquatiques (-1,4 %), l'abondance relative des pollinisateurs dans les milieux agricoles (+2,7 %) et le nombre total de pollinisateurs sur le territoire (+1,5 %) (tableau 6). Si le développement du territoire suit cette voie, il y aura davantage de sédiments (+9,8 %) et de phosphore (+21 %) dans les rivières, le ruissellement de surface augmentera (+1,2 %) et le carbone stocké sera moindre (-0,75 %) que ce qui est actuellement stocké par les écosystèmes du territoire.

La diminution des quantités d'azote retrouvées dans les milieux aquatiques est due à la légère réduction des superficies agricoles au profit des milieux urbains où cet intrant chimique n'est pas utilisé. Le nombre et l'abondance des pollinisateurs sauvages augmentent pour leur part suite à l'étalement urbain et la réduction des superficies agricoles. S'il peut paraître contre-intuitif que l'étalement urbain soit positif

<sup>11</sup> L'unité utilisée est la différence de superficie (en pourcentage) occupée par les corridors de connectivité en comparaison avec le portrait actuel.

pour les pollinisateurs, les milieux urbains peu denses offrent pourtant des habitats de qualité grâce aux jardins résidentiels souvent plus diversifiés en ressource florale et en type d'habitat que certains milieux naturels (p. ex. Wenzel et al. 2020).

Les résultats pour les indicateurs de connectivité sont plus mitigés (*tableau 7*). La superficie des corridors écologiques baisse pour toutes les espèces mis à part pour la musaraigne (+7 %) où on note un léger gain territorial. Ce gain est à attribuer au vieillissement des forêts, qui représentent des habitats de qualité pour la musaraigne.

Quant à l'indice de capacité des métapopulations, on constate une amélioration de la situation pour la grande musaraigne (+20 %), la martre d'Amérique (+70 %) et l'ours noir (+40 %). Ces résultats s'expliquent par le vieillissement des forêts, créant de nouvelles parcelles d'habitat préférentielles, ainsi que l'augmentation légère de la superficie des forêts mixtes et feuillues comparativement au portrait actuel, grâce à la succession naturelle des milieux en friche. L'indice de capacité des métapopulations reste en revanche similaire pour la salamandre tandis qu'il se dégrade pour la grenouille des bois (-10 %). La différence de tendances entre cet indice et la variation en superficie de corridors de déplacement s'explique par le fait que l'indice de capacité ne tient pas compte des potentielles barrières au déplacement à travers le paysage. Ainsi, l'augmentation de la capacité d'un territoire à supporter la faune ne se traduit pas nécessairement par une meilleure circulation à travers le territoire.

En résumé, sans mesure visant à contrôler l'étalement urbain, la majorité des services écosystémiques voient leur valeur chuter au détriment de la population locale. L'étalement urbain se répercute également sur la faune avec une perte de connectivité des milieux naturels du territoire et par conséquent une capacité d'accueil des populations animales à la baisse.

### 3.2.2. Bilan du scénario 2, Compensation

L'approvisionnement en SÉ du scénario 2 *Compensation* est similaire aux tendances observées pour le scénario 1 *Statu quo* (*tableau 6*). On dénote ainsi une perte en SÉ comparativement au portrait actuel, même si celle-ci est moins marquée qu'au scénario 1. La restauration des milieux en friches permet notamment de réduire fortement les quantités de sédiments exportés vers les cours d'eau comparé au scénario 1. Les quantités d'azote lessivé vers les rivières sont également légèrement inférieures à celles du scénario 1. L'abondance et le nombre de pollinisateurs sauvages présentent des trajectoires opposées. Par rapport au portrait actuel, il y a une augmentation de l'abondance des pollinisateurs dans les parcelles agricoles (+1,3 %) suite à la diminution des superficies agricoles, peu attrayantes pour les pollinisateurs. À l'inverse, on constate une diminution du nombre total de pollinisateurs sur le territoire (-0,6 %) liée à la perte d'espaces en friches au profit de forêts mixtes, écosystèmes moins favorables aux pollinisateurs. Enfin, le bilan hydrique et les stocks de carbone restent équivalents aux valeurs observées de nos jours.

En termes de connectivité, les valeurs de ce scénario restent similaires à celles du scénario 1 quoique légèrement meilleures (*tableau 7*).

Ainsi, telle que modélisée via ce scénario, la restauration des milieux naturels ne suffit pas à atteindre les objectifs fixés, soit d'améliorer le stockage de carbone et le bilan hydrique du territoire. La restauration

n'a pas d'impacts positifs assez grands sur ces deux services écosystémiques à l'échelle de la MRC Nicolet-Yamaska, ni non plus au niveau de la connectivité écologique du territoire.

### 3.2.3. Bilan du scénario 3, Renaturalisation

Dans le cas du scénario 3 *Renaturalisation*, les valeurs de la majorité des services écosystémiques augmentent par rapport au portrait actuel (*tableau 6*). On observe une franche réduction des quantités de sédiments (-16,1 %) et d'azote (-19 %) dans les rivières. La quantité de phosphore reste en revanche supérieure à celle observée aujourd'hui (+7,2 %). De faibles doses de phosphore sont en effet souvent utilisées en milieu urbain pour fertiliser les pelouses et puisque ce scénario implique une augmentation de la superficie urbanisée d'ici à 2070, il n'est pas surprenant de voir la quantité de phosphore augmenter, et ce malgré l'augmentation des forêts sur le territoire. L'abondance des pollinisateurs augmente légèrement (+1 %) alors que le nombre de pollinisateurs sauvages diminue légèrement (-0,9 %) proportionnellement au portrait actuel. Ce scénario obtient d'ailleurs de moins bons résultats que les scénarios 1 et 2 pour ces indicateurs, car l'ensemble des friches, des écosystèmes de grande qualité pour les pollinisateurs, est remplacé par des forêts mixtes, relativement moins favorables aux abeilles indigènes selon les modèles développés pour le sud du Québec (Martins et al. 2018). Le bilan hydrique du territoire s'améliore toutefois grandement comparé au portrait actuel. Le ruissellement de surface diminue de 10,1 % grâce aux forêts qui ralentissent la vitesse d'écoulement de l'eau et permettent une meilleure absorption de l'eau dans le sol. L'amélioration de ce service se répercute également sur la quantité de sédiments exportée vers les milieux aquatiques. Enfin, les stocks de carbone contenus dans les écosystèmes de la MRC augmentent d'environ 5 % par rapport au portrait actuel.

Au niveau de la connectivité, tous les indicateurs surpassent ceux observés actuellement mis à part pour la superficie des corridors de déplacement pour la grenouille des bois (*tableau 7*). Dans ce cas précis, on observe une réduction de la superficie des corridors (-41 %), mais elle doit être relativisée en raison de la méthodologie employée. En effet, on dénombre plus de parcelles d'habitat pour le scénario 3 vis-à-vis du portrait actuel ce qui favorise la création de nouveaux corridors de déplacement à travers le territoire. Or, de par la méthode employée qui ne permet pas de comptabiliser les superficies éventuellement gagnées par de nouveaux corridors sur le territoire, ces superficies ne sont pas traduites en gain via l'indicateur de connectivité. En revanche, si on se réfère à l'indice de capacité des métapopulations, l'augmentation en parcelles d'habitat via l'atteinte de 45 % de milieux naturels sur le territoire serait telle que la population pourrait théoriquement doubler (+120 %) par rapport au portrait actuel.

En résumé, ce troisième scénario remplit ses objectifs visant à maximiser les bénéfices écologiques tout en accroissant la connectivité écologique entre les milieux naturels de la MRC. Les gains pour la biodiversité sont en effet substantiels, tant en termes de connectivité que de capacité d'accueil du territoire pour la faune. De tels résultats indiquent toutefois la nécessité pour la MRC de procéder à une franche transformation du paysage, avec la réduction de surfaces agricoles au profit d'espaces boisés. La simple compensation des milieux naturels perdus, comme proposée au scénario 2, n'est en effet pas suffisante pour améliorer uniformément la connectivité et les services écosystémiques de la MRC.

## CONCLUSION

---

La MRC Nicolet-Yamaska fait figure de pionnière au Québec en matière d'inclusion des enjeux environnementaux dans sa vision et sa stratégie de développement pour le territoire. La présente étude fournit un premier portrait de la valeur écologique actuelle des milieux naturels qui compose son territoire, afin de favoriser une prise de décision informée et stratégique quant à l'aménagement du territoire.

La contribution des milieux naturels a été évaluée à travers l'approvisionnement de cinq services écosystémiques clés, le rôle des milieux naturels dans le réseau de connectivité écologique du paysage et le niveau de résilience des milieux naturels face aux changements globaux. Au-delà des résultats et des chiffres produits, cette étude illustre le besoin de mieux connaître le rôle de chaque type de milieu naturels au sein d'un territoire et d'identifier ceux qui sont essentiels au maintien de l'intégrité écologique et à la santé des écosystèmes. Les milieux à plus faible valeur peuvent quant à eux offrir un potentiel de restauration important, notamment selon leur localisation et les enjeux environnementaux locaux. L'approche multicritère permet par ailleurs d'adopter une vision intégrée et d'optimiser les impacts positifs des solutions mises en œuvre sur le territoire, en identifiant par exemple les secteurs prioritaires à la protection ou à la restauration.

La modélisation de scénarios théoriques constitue aussi un outil puissant d'aide à la décision puisqu'elle permet de comparer les gains et les pertes associées à différentes stratégies d'aménagement du territoire. Ainsi, au rythme actuel de l'étalement urbain, le territoire de 2070 serait en perte nette de services du fait de la disparition des milieux naturels au profit du développement. Seuls d'importants efforts de restauration, impliquant notamment la conversion de terrains agricoles en milieux boisés, permettraient d'améliorer sensiblement l'approvisionnement en services rendus par les milieux naturels, leur niveau de connectivité et leur résilience.

Ce premier portrait permettra à la MRC de planifier stratégiquement son développement territorial en s'appuyant sur des données tangibles de la contribution des milieux naturels de son territoire.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- AAFC. (2015). Land use 1990, 2000 and 2010 (LU1990, LU2000, LU2010). Agriculture and Agri-Food Canada, ON. 13 pages.
- Anantharaman, R., Hall, K., Shah, V., & Edelman, A. (2019). Circuitscape in julia: High performance connectivity modelling to support conservation decisions. *ArXiv*, 1–9. <https://doi.org/10.21105/jcon.00058>
- Apex Resource Management Solutions (2022). ST-Sim state-and-transition simulation model software. URL: <http://www.apexrms.com/stsm/>
- 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 (6), 1383–1396.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300 (9), D05109.
- Aquilué, N., Filotas, É., Craven, D., Fortin, M. J., Brotons, L., & Messier, C. (2020). Evaluating forest resilience to global threats using functional response traits and network properties. *Ecological Applications*, 30 (5), e02095.
- Bast, L., Mullen, R., O'Halloran, I., Warncke, D., & Bruulsema, T. (2009). Phosphorus balance trends on agricultural soils of the Lake Erie drainage basin. *Better Crops*, 93 (1), 6–8.
- Bélanger, L., & Grenier, M. (2002). Agriculture intensification and forest fragmentation in the St. Lawrence valley, Québec, Canada. *Landscape ecology*, 17 (6), 495–507.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*, Vol.15, No.4, 365–377.
- Bernal, B. & Mitsch, W. J. (2012). Comparing carbon sequestration in temperate freshwater wetland communities. *Global Change Biology*, 18 (5), 1636-1647p.
- Brandt, L. A., Derby Lewis, A., Scott, L., Darling, L., Fahey, R. T., Iverson, L., & Swanston, C. W. (2017). Chicago Wilderness region urban forest vulnerability assessment and synthesis: a report from the Urban Forestry Climate Change Response Framework Chicago Wilderness pilot project. Gen. Tech. Rep. NRS-168. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 142 p.
- Chen, D., Hu, M., Guo, Y., & Dahlgren, R. A. (2015). Influence of legacy phosphorus, land use, and climate change on anthropogenic phosphorus inputs and riverine export dynamics. *Biogeochemistry*, 123 (1), 99–116.
- Chen, D., Huang, H., Hu, M., & Dahlgren, R. A. (2014). Influence of lag effect, soil release, and climate change on watershed anthropogenic nitrogen inputs and riverine export dynamics. *Environmental science & technology*, 48 (10), 5683–5690.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B.,... & Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *nature*, 387 (6630), 253–260.
- CRAAQ (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec). (2022). Guide des cultures de couverture en grandes cultures (1<sup>er</sup> ed). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 204 p. Disponible à : <https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/guide-des-cultures-de-couverture-en-grandes-cultures/p/PSOL0109>
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec [CRAAQ]. (2010). Guide de référence en fertilisation (2e ed.). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 473 p.
- Csàrdi, G. & Nepusz, T. (2006). The igraph software package for complex network research. *InterJournal Complex Systems*, 1965.
- Daryanto, S., Fu, B., Wang, L., Jacinthe, P. A., & Zhao, W. (2018). Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. *Earth-Science Reviews*, 185, 357–373.

- Deng, L., Zhu, G. Y., Tang, Z. S., & Shangguan, Z. P. (2016). Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks. *Global Ecology and Conservation*, 5, 127–138.
- Dodds, W. K., Bouska, W. W., Eitzmann, J. L., Pilger, T. J., Pitts, K. L., Riley, A. J., ... & Thornbrugh, D. J. (2009). Eutrophication of US freshwaters: Analysis of potential economic damages, *Environ. Sci. Technol.*, 43 (1), 12–19.
- Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S., Meyzonnat, G. (2021a). *HydroBudget User Guide — Version 1.2*. Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec (Canada). 35 p.
- Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S., & Meyzonnat, G. (2021b). Simulation of long-term spatiotemporal variations in regional-scale groundwater recharge: Contributions of a water budget approach in cold and humid climates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25 (12), 6567–6589.
- Dupras, J., & Alam, M. (2015). Urban sprawl and ecosystem services: a half century perspective in the Montreal area (Quebec, Canada). *Journal of environmental policy & planning*, 17 (2), 180–200.
- Environnement et Changement Climatique Canada [ECCC]. (2020). A healthy environment and a healthy economy canada's strengthened climate plan to create jobs and support people, communities and the planet, annex carbon pollution pricing, 79p. Consulté à : [https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/climate-change/climate-plan/annex\\_pricing\\_carbon\\_pollution.pdf](https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/climate-change/climate-plan/annex_pricing_carbon_pollution.pdf)
- Environnement et Changement Climatique Canada [ECCC] et Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques [MDDELCC]. (2018). Cartographie de l'occupation du sol des basses-terres du Saint Laurent. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/cartographie-de-l-occupation-du-sol-des-basses-terres-du-saint-laurent>
- Fairbanks, J., Besaneon, M., Simon, Scholly, Hoffiman, J. Eubank, N., Karpinski, S. (2021). JuliaGraphs/Graphs.jl: an optimized graphs package for the Julia programming language. <https://github.com/JuliaGraphs/Graphs.jl/>
- Fankhauser, S. (1994). The social costs of greenhouse gas emissions: an expected value approach. *The Energy Journal*, 15 (2), 157-184p.
- FAO. (2019). *FAO's Global Action on Pollination Services for Sustainable Agriculture*. Consulté à : <http://www.fao.org/pollination/en/>
- Financière agricole du Québec. (2018). Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées. <https://www.fadq.qc.ca/documents/donnees/base-de-donnees-des-parcelles-et-productions-agricoles-declarees/>
- Garneau, M., & Van Bellen, S. (2016). Synthèse de la valeur et la répartition du stock de carbone terrestre au Québec. Rapport final présenté au Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques du Québec.
- Gilbert, M., Madden, C.J., Boynton, W., Flemer, D., Heil, C., Sharp, D. (2010). *Nutrients in Estuaries: Summary Report of National Estuarine Experts Workgroup 2005–2007; EPA Contract No. 68-C-02-91 and EP-6-07-025; United States Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 188p.*
- Goyette, J. O., Bennett, E. M., & Maranger, R. (2018). Low buffering capacity and slow recovery of anthropogenic phosphorus pollution in watersheds. *Nature Geoscience*, 11 (12), 921–925.
- Habitat. (2020). Résultats et recommandations pour le plan de conservation de la municipalité d'Hudson. Pour la Ville de Hudson. 111 p. + annexes.
- Hamel, P., Valencia, J., Schmitt, R., Shrestha, M., Piman, T., Sharp, R.P., Francesconi, W., Guswa, A.J., (2020). Modeling seasonal water yield for landscape management: Applications in Peru and Myanmar. *Journal of Environmental Management* 270, 110,792.
- Hamel, P., Chaplin-Kramer, R., Sim, S., & Mueller, C. (2015). A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. *Science of the Total Environment*, 524, 166–177.

- Hamel, P., & Guswa, A. J. (2014). Uncertainty analysis of a spatially-explicit annual water-balance model: case study of the Cape Fear catchment, NC. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 11 (9).
- Hansen, L. & Ribaud, M. (2008). Economic measures of soil conservation benefits: Regional values for policy assessment. *USDA Technical Bulletin*, 25p.
- Hanski, I., & Ovaskainen, O. (2000). The metapopulation capacity of a fragmented landscape. *Nature*, 404 (6779), 755–758.
- Hanski, I. (1994). A practical model of metapopulation dynamics. *Journal of animal ecology*, 151–162.
- Howarth, R. W., et al. (2000). Nutrient pollution of coastal rivers, bays, and seas, *Issues Ecol.*, 7, 1–15.
- Huang, R., Pimm, S. L., & Giri, C. (2020). Using metapopulation theory for practical conservation of mangrove endemic birds. *Conservation Biology*, 34 (1), 266–275.
- 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, QC, 170 p.*
- Jobin, B., Latendresse, C., Grenier, M., Maisonneuve, C., & Sebbane, A. (2010). Recent landscape change at the ecoregion scale in Southern Québec (Canada), 1993–2001. *Environmental monitoring and assessment*, 164 (1), 631–647.
- Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, 274 (1608), 303–313.
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Boukalova, Z., Ertürk, A., Goldscheider, N., ... & Widerlund, A. (2011). Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends. *Environmental Science & Policy*, 14 (7), 770–781.
- Krongdang, S., Evans, J. D., Pettis, J. S., & Chantawannakul, P. (2017). Multilocus sequence typing, biochemical and antibiotic resistance characterizations reveal diversity of North American strains of the honey bee pathogen *Paenibacillus larvae*. *PLoS One*, 12 (5), e0176831.
- Latendresse, C., Jobin, B., Baril, A., Maisonneuve, C., Boutin C., Côté, D. (2008). Dynamique spatio-temporelle des habitats fauniques dans l'écorégion des basses terres du fleuve Saint-Laurent, 1950-1997. *Série de rapports techniques n° 494, Environnement Canada, Service canadien de la faune, région du Québec, Québec, 83 p. + annexes.*
- Losey, J. E., & Vaughan, M. (2006). The economic value of ecological services provided by insects. *Bioscience*, 56 (4), 311–323.
- Lovett, G. M., Weiss, M., Liebhold, A. M., Holmes, T. P., Leung, B., Lambert, K. F., ... & Weldy, T. (2016). Nonnative forest insects and pathogens in the United States: Impacts and policy options. *Ecological applications*, 26 (5), 1437–1455.
- Major, P. (2020). Modélisation spatiale des stocks en carbone, azote et phosphore des tourbières laurentiennes. [Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal]. Papyrus. <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/24224>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation [MAPAQ]. (En ligne). Une culture de couverture qui rapporte plus. <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/outaouais/infolettre/Pages/Faites-des-cultures-de-couverture-vos-alliees.aspx>
- Marshman, J., Blay-Palmer, A., & Landman, K. (2019). Anthropocene crisis: climate change, pollinators, and food security. *Environments*, 6 (2), 22.

- Martins, K. T., Gonzalez, A. & Lechowicz, M. J. (2017). Patterns of pollinator turnover and increasing diversity associated with urban habitats. *Urban Ecosystems* 20 (6), 1359-1371p.
- Martins, K. T., Albert, C. H., Lechowicz, M. J., & Gonzalez, A. (2018). Complementary crops and landscape features sustain wild bee communities. *Ecological Applications*, 28 (4), 1093-1105p.
- Matthews, S.N., Iverson, L.R., Prasad, A.M., Peters, M.P., Rodewald, P.G. (2011). Modifying climate change habitat models using tree species-specific assessments of model uncertainty and life history-factors. *Forest Ecology and Management*, 262 (8): 1460– 1472.
- Maziarz, J., Vourlitis, G. L., & Kristan, W. (2019). Carbon and nitrogen storage of constructed and natural freshwater wetlands in southern California. *Ecological Engineering*, 142, 100,008.
- McCullough, D.G., Heyd R.L. & O'Brien, J.G. (2005). Biology and management of beech bark disease: Michigan's newest exotic forest pest. Michigan State University Extension, bulletin E-2746.
- McRae, B. H., Shah, V., & Mohapatra, T. (2014). Circuitscape User Guide. <http://www.circuitscape.org>
- MELCC. (Non daté). Précipitations en hausse depuis 1960 — l'équivalent d'un treizième mois ajouté au total annuel. <https://environnement.gouv.qc.ca/climat/surveillance/1960-2015.htm>
- Ministère de la flore, de la faune et des Parc [MFFP]. (2021). IEQM : Carte écoforestière à jour. Ministère des forêts de la faune et des Parcs. <https://www.donneesquebec.ca/>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC]. (2018). Utilisation du territoire 2018 [TIF]. <https://www.donneesquebec.ca>
- Ministère des Ressources naturelles et des Forêts [MRNF]. (2022). LiDAR - Modèles numériques (terrain, canopée, pente). <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/produits-derives-de-base-du-lidar>
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2000). The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological economics*, 35 (1), 25–33.
- Moilanen, A., Arponen, A., Leppänen, J., Meller, L., & Kujala, H. (2011). Zonation: Spatial conservation planning framework and software version 3.0 user manual. <https://researchportal.helsinki.fi>
- MRC Nicolet-Yamaska. (2019). Plan de transition écologique. 70 p. [https://mrcnicolet-yamaska.qc.ca/fr/la-mrc/plan\\_de\\_transition\\_ecologique](https://mrcnicolet-yamaska.qc.ca/fr/la-mrc/plan_de_transition_ecologique)
- Nistor, M. M., Man, T. C., Benzaghta, M. A., Nedumpallile Vasu, N., Dezsi, Ş., & Kizza, R. (2018). Land cover and temperature implications for the seasonal evapotranspiration in Europe. *Geographia Technica*, 13 (1).
- Olewiler, N. (2004). The Value of Natural Capital in Settled Areas of Canada. Ducks Unlimited Canada and the Nature Conservancy of Canada. 36p.
- Ouranos. (2021). Portrait climatique Centre du Québec. <https://portclim.ouranos.ca/#/regions/5>
- Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (2008). Climate change 2007. Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fourth assessment report.
- Paquette, A., Sousa-Silva, R., Maure, F., Cameron, E., Belluau, M., & Messier, C. (2021). Praise for diversity: A functional approach to reduce risks in urban forests. *Urban Forestry & Urban Greening*, 62, 127,157.
- Porto, R. G., de Almeida, R. F., Cruz-Neto, O., Tabarelli, M., Viana, B. F., Peres, C. A., & Lopes, A. V. (2020). Pollination ecosystem services: A comprehensive review of economic values, research funding and policy actions. *Food Security*, 12 (6), 1425–1442.
- Pureswaran, D., De Grandpré, L., Paré, D., Taylor, A., Barrette, M., Morin, H.,... & Kneeshaw, D. (2015). Climate-induced changes in host tree—insect phenology may drive ecological state-shift in boreal forests. *Ecology*, 96 (6), 1480–1491.

- Rayfield, B., Larocque, G., Martins, K. T., Lucet, V., Daniel, C., & Gonzalez, A. (2021). 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. 34 p.
- 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. Données du SIG [ArcMap, ESRI Canada]. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec (Québec).
- Sattari, S. Z., Bouwman, A. F., Giller, K. E., & van Ittersum, M. K. (2012). Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (16), 6348–6353.
- Scharlemann, J. P., Tanner, E. V., Hiederer, R., & Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5 (1), 81–91.
- Schnell, J. K., Harris, G. M., Pimm, S. L., & Russell, G. J. (2013). Estimating extinction risk with metapopulation models of large-scale fragmentation. *Conservation Biology*, 27 (3), 520–530. Sharpley, A.,
- Jarvie, H. P., Buda, A., May, L., Spears, B., & Kleinman, P. (2013). Phosphorus legacy: Overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment. *Journal of environmental quality*, 42 (5), 1308–1326.
- Sothe, C., Gonsamo, A., Arabian, J., Kurz, W. A., Finkelstein, S. A., & Snider, J. (2022). Large soil carbon storage in terrestrial ecosystems of Canada. *Global Biogeochemical Cycles*, 36 (2), e2021GB007213.
- Statistique Canada. (2014). Irrigation methods and conservation practices on Canadian farms. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/16-508-x/16-508-x2016001-eng.pdf>
- Stott, I., Townley, S., Carslake, D., & Hodgson, D. J. (2010). On reducibility and ergodicity of population projection matrix models. *Methods in Ecology and Evolution*, 1 (3), 242–252.
- Strimas-Mackey, M., & Brodie, J. F. (2018). Reserve design to optimize the long-term persistence of multiple species. *Ecological Applications*, 28 (5), 1354–1361.
- Vitousek, P. Mooney, M., H. A., Lubchenco, J. & Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems, *Science*, 277 (5325), 494–499.
- Webster, K. L., Bhatti, J. S., Thompson, D. K., Nelson, S. A., Shaw, C. H., Bona, K. A., ... & Kurz, W. A. (2018). Spatially integrated estimates of net ecosystem exchange and methane fluxes from Canadian peatlands. *Carbon balance and management*, 13 (1), 1-21p.
- Wenzel, A., Grass, I., Belavadi, V. V., & Tscharnkte, T. (2020). How urbanization is driving pollinator diversity and pollination—A systematic review. *Biological Conservation*, 241, 108,321.
- Werf, G. R. V. D., Morton, D. C., DeFries, R. S., Olivier, J. G. J., Kasibhatla, P. S., Jackson, R. B.,... & Randerson, J. T. (2009). CO2 emissions from forest loss. *Nat Geosci*, 2 (11), 737–738.
- West, T. O., & Marland, G. (2002). A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91 (1–3), 217–232.

## ANNEXE

ANALYSE	INTRANT	LOGICIELS	SORTIES	LITTÉRATURE
<b>Contrôle de l'érosion</b>	occupation des sols, topographie du territoire (modèle numérique de terrain), données pédologiques, érosivité des précipitations locales, facteurs de cultures végétales et de gestion	SDR: <i>Sediment delivery ratio</i> (InVest)	Quantité (en tonnes) de sédiments : <ul style="list-style-type: none"> <li>- exportés vers les milieux aquatiques</li> <li>- retenues par les milieux terrestres</li> <li>- déplacés sans que ceux-ci terminent dans un milieu aquatique</li> </ul>	ECCC et MDDELCC (2018) Hamel et al. (2015) Hengl et al. (2017) MELCC (2018) Panagos et al. (2017) Wall et al. (2002) Patoine (2017) Pedo-Paysage Canada (2010)
<b>Qualité de l'eau des milieux aquatiques</b>	occupation des sols, topographie du territoire (modèle numérique de terrain), délimitation des bassins versants, quantité d'azote et de phosphore par type de culture	NDR: <i>Nutrient Delivery Ratio</i> (InVest)	Quantité (en kilogrammes) de nutriments : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Azote exporté vers les milieux aquatiques</li> <li>- Phosphore exporté vers les milieux aquatiques</li> </ul>	ECCC et MDDELCC (2018) Hamel & Guswa (2014) MELCC (2018) Patoine (2017) CRAAQ (2010)
<b>Bilan hydrique</b>	occupation des sols, précipitation mensuelle (2009 à 2018), évapotranspiration mensuelle (2009 à 2018), relief du territoire, groupe hydrologique des sols	<i>Seasonal water yield</i> (InVest), CDO ( <i>Climate Data Operators</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Indice relatif (0 à 1) de recharge des nappes souterraines,</li> <li>- Indice relatif (0 à 1) de ruissellement de surface</li> </ul>	Allen et al. (1998) Dubois et al. (2021a) Dubois et al. (2021 b) ECCC et MDDELCC (2018) Hamel et al. (2020) MELCC (2018) Nistor et al. (2018)

ANALYSE	INTRANT	LOGICIELS	SORTIES	LITTÉRATURE
<b>Pollinisation</b>	occupations des sols, disponibilité des ressources florales et de nidification par type d'occupation des sols, traits fonctionnels des espèces de pollinisateurs (distance de dispersion), délimitation des parcelles agricoles et type de cultures	<i>Crop pollination</i> (InVest)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abondance relative des pollinisateurs sauvages dans les parcelles agricoles</li> <li>- Dépendance des milieux agricoles à la pollinisation</li> <li>- Nombre total de pollinisateurs sauvages pour l'ensemble du territoire</li> </ul>	Klein et al. (2007) Martins et al. (2017, 2018) MELCC (2018)
<b>Stockage du carbone</b>	occupation des sols, délimitation des peuplements forestiers, le volume de bois marchand par espèce d'arbre par peuplement, le carbone organique du sol (0-30 cm), taux du stockage de carbone (tn C/ha) par type d'occupation des sols, rapport racine : tige par type d'occupation des sols	Flux de travail développé par Habitat, le calculateur de biomasse selon l'inventaire forestier national du Canada (IFN)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stockage de carbone dans la biomasse</li> <li>- Stockage de carbone dans les sols</li> </ul>	Garneau et Van Bellen (2016) Goslee et al. (2014) IFN (2016) MFFP (2021) Ruesch & Gibbs (2008)
<b>Connectivité écologique</b>	occupation des sols, indice de qualité des habitats, indice de résistance du paysage, distance de dispersion des espèces fauniques, nœuds prioritaires pour la conservation et la connectivité	Flux de travail développé par Habitat et l'Université McGill (Connect2), Grainscape, Igraph, Circuitscape, Spatial Graphs, Zonation	Indice de qualité des habitats, Parcelles d'habitats, Flux du courant, Indice de centralité intermédiaire, Connectivité nœud à nœud Connectivité	Albert et al. (2017) Anantharaman (2019) Csàrdi & Nepusz (2006) ECCC et MDDELCC (2018) Fairbanks et al. (2021) MELCC (2018) McRae et al. (2014) Moilanen (2011)

ANALYSE	INTRANT	LOGICIELS	SORTIES	LITTÉRATURE
			omnidirectionnelle	Rayfield et al. (2019) Rayfield et al. (2021)
<b>Indice de capacité des métapopulations</b>	Parcelles d'habitats, caractéristiques des parcelles d'habitats (taille, configuration), distance maximale de dispersion des espèces	Flux de travail développé par Habitat et l'Université McGill, MPC	Indice de capacité des métapopulations	Hanski (1994) Hanski & Ovaskainen (2000) Huang et al. (2020) Schnell et al. (2013) Strimas-Mackey & Brodie (2018) Stott et al. (2010)
<b>Diversité fonctionnelle des milieux boisés</b>	Délimitation des peuplements forestiers, le volume de bois marchand par espèce d'arbre par peuplement, groupes fonctionnels des espèces d'arbres	Flux de travail développé par Habitat	Indice de diversité fonctionnelle des milieux boisés	Paquette et al. (2021) Aquilué et al. (2021) MFFP (2021)
<b>Vulnérabilités biologiques et climatiques</b>	Délimitation des peuplements forestiers, le volume de bois marchand par espèce d'arbre par peuplement, le niveau de vulnérabilité des espèces d'arbres aux menaces biotiques et abiotiques	Flux de travail développé par Habitat	Indice de vulnérabilités biologiques, indice des vulnérabilités climatiques	Brandt et al. (2017) Lovett et al. (2016) Matthew et al. (2011) MFFP (2021)

ANALYSE	INTRANT	LOGICIELS	SORTIES	LITTÉRATURE
<b>Urbanisation et intensification agricole</b>	occupation des sols, taux de transition historique d'occupation des sols par municipalité (2000-2010), l'âge des peuplements forestiers, distance auprès des milieux urbains, distance auprès des autoroutes, zones de conservation, zones potentielles pour le développement urbain, paramètres d'étalement urbain et de succession naturelle	Flux de travail développé par Habitat en collaboration avec Apex RMS. SyncroSim	Indice de susceptibilité des milieux naturels au développement	AAFC (2015) Apex RMS (2022) MFFP (2021)
<b>Milieu naturel prioritaire selon Jobin et al. (2019)</b>	occupation des sols, sites multi cibles prioritaires pour la conservation selon l'Atlas des Basses-terres du Saint-Laurent	Traitement géomatique effectué à l'aide de R	Milieu naturel prioritaire selon Jobin et al. (2019)	Jobin et al. (2019)
<b>Priorités de conservation des milieux naturels</b>	Variables énumérées dans le tableau 5	Zonation	Priorités de conservation des milieux naturels	Moilanen et al. (2011)
<b>Scénarios d'occupation des sols</b>	occupation des sols, résultats du modèle d'urbanisation de d'intensification agricole, résultats de l'analyse connectivité nœud à nœud, résultats du bilan hydrique, topographie, qualité des sols	Flux de travail développé par Habitat Traitement géomatique effectué à l'aide de R	Couche d'occupation des sols pour trois scénarios, estimation de l'impact des scénarios d'occupation des sols sur les services écosystémiques et la connectivité	Financière agricole du Québec (2018) MRNF (2022) Pedo-Paysage Canada (2010)



[www.habitat-nature.com](http://www.habitat-nature.com)

5818 Blvd Saint-Laurent, Montréal, H2T 1T3, QC

[info@habitat-nature.com](mailto:info@habitat-nature.com) | (438) 825-4445