

Mai 2025

# Équilibrer l'agriculture et la conservation dans les Prairies canadiennes

Rapport *Recherche* préparé pour  
l'ICPA par Ehsan Pashanejad



Rapport  
*Recherche*



Institut canadien des politiques agro-alimentaires  
960, avenue Carling, bâtiment 60 du CEF  
Ottawa, ON K1A 0C6  
[capi-icpa.ca](http://capi-icpa.ca)

L'Institut canadien des politiques agro-alimentaires a pour mission de diriger l'élaboration des politiques, de collaborer avec ses partenaires et de faire progresser les solutions politiques dans le domaine de l'agriculture et de l'alimentation.



Ce rapport est soutenu en partie par RBC Fondation par le biais de RBC Tech for Nature dans le cadre de l'initiative environnementale plus large de l'ICPA, Fer de lance des solutions durables.

L'ICPA remercie son groupe de pairs évaluateurs et le Comité consultatif pour leurs commentaires sur les versions antérieures de ce rapport. Les résultats, interprétations et conclusions de ce rapport n'engagent que son auteur.

## Note de l'ICPA

L'ICPA reconnaît l'importance de favoriser et d'encadrer la prochaine génération de leaders d'opinion issus de programmes de doctorat partout au Canada, qui travaillent dans des domaines multidisciplinaires. Grâce à son programme de boursiers de doctorat, l'ICPA offre à un petit groupe innovateur de jeunes étudiants l'occasion d'appliquer leurs connaissances et leur expertise à certains des enjeux politiques les plus importants en agriculture.

La quatrième cohorte de boursiers doctoraux de l'ICPA (2024-2025) a été chargée d'axer ses recherches sur les politiques nécessaires pour répondre aux pressions exercées sur les terres et les ressources naturelles du Canada par la production agricole face au changement climatique, à la perte de biodiversité, à la croissance démographique mondiale et aux préoccupations en matière de sécurité alimentaire. Ce document est le résultat final du programme, mettant en évidence la nature interdisciplinaire de la recherche des boursiers en ce qui concerne l'atténuation des compromis entre la conservation et la production agricole intensive dans les Prairies.

Cette bourse est soutenue en partie par RBC Fondation par le biais de RBC Tech for Nature dans le cadre de l'initiative environnementale plus large de l'ICPA, les Politiques sur l'utilisation des terres, l'agriculture et la nature (PLAN).

L'ICPA et les boursiers de doctorat aimeraient souligner la contribution des quatre membres du Comité consultatif d'experts qui ont fourni de précieux commentaires lors de la préparation de ce rapport – Dr. **Marie-Élise Samson**, Université Laval, Dr. **Tom Nudds**, Université de Guelph, **Peter Sykanda**, Fédération de l'agriculture de l'Ontario, et **Anatoliy Oginsky**, ministère de l'Agriculture et des Forêts de l'Alberta.

## Points saillants

- **Les paysages naturels, en particulier les prairies et les zones humides, jouent un rôle essentiel dans le maintien de la multifonctionnalité.** Ils sont les principaux moteurs de la conservation de la biodiversité, de la régulation de l'eau et de la séquestration du carbone, même dans les régions agricoles gérées de manière intensive.
- **Les points chauds des services écosystémiques clés représentent des zones stratégiques pour l'investissement dans la conservation.** Les 35 % d'unités de paysage les plus élevées - qui représentent environ 19 % des prairies canadiennes - assurent plus de la moitié des services écosystémiques clés, tandis que les zones restantes soutiennent principalement le stockage du carbone, la rétention des nutriments et la productivité des cultures.
- **L'évaluation des paysages multifonctionnels dans les prairies canadiennes peut guider des interventions plus ciblées en matière de gestion des terres.** Cela peut aider les décideurs politiques et les planificateurs à donner la priorité aux zones où les services écosystémiques peuvent être protégés ou améliorés sans nuire à la productivité. Les politiques futures devraient s'appuyer sur ces connaissances pour soutenir les décisions au niveau de l'exploitation et la planification régionale, en alignant les engagements nationaux sur les actions pratiques sur le terrain.
- **Les zones présentant une grande diversité d'ES sont souvent caractérisées par un mélange d'utilisations des terres naturelles et agricoles.** Elles sont idéales pour aligner les objectifs de conservation et de production. Des approches incitatives telles que les zones tampons ripariennes, l'agroforesterie et l'agriculture à faible intensité peuvent améliorer la diversité des services tout en maintenant la rentabilité
- **La mise en œuvre efficace des politiques dépend de la collaboration intersectorielle.** Les décideurs politiques doivent impliquer les agriculteurs, les détenteurs de droits autochtones, les chercheurs et les communautés afin de développer conjointement des solutions pratiques et spécifiques à la région qui favorisent une gestion partagée et des résultats durables.

# Table des matières

<b>NOTE DE L'ICPA</b>	<b>3</b>
<b>POINTS SAILLANTS</b>	<b>3</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>4</b>
<b>GLOSSAIRE DES TERMES CLÉS</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>6</b>
<b>CONTEXTE</b>	<b>7</b>
Le rôle des prairies canadiennes dans la fourniture de services écosystémiques et la productivité agricole	7
Gestion multifonctionnelle des terres pour des paysages résilients	8
<b>RÉSULTATS</b>	<b>9</b>
Points chauds de la multifonctionnalité des services écosystémiques	9
Interactions spatiales de la multifonctionnalité cumulative avec la diversité des SE (α-multifonctionnalité)	13
<b>IMPLICATIONS POLITIQUES</b>	<b>16</b>
<b>MÉTHODE</b>	<b>17</b>
Quantification des principaux services écosystémiques	18
Indices de multifonctionnalité des SE	20
<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>22</b>



# Glossaire des termes clés

Termes	Définition
<b>Agroécosystème</b>	Un paysage spécialisé, géré par l'homme, où l'agriculture interagit avec les systèmes naturels, comprend les champs, les pâturages, les zones humides, les forêts et le milieu environnant qui les soutient.
<b>Albedo</b>	La quantité de lumière solaire réfléchiée par la surface de la Terre. Les cultures de couleur claire ou les types de couverture réfléchissent davantage la lumière du soleil et peuvent contribuer à réduire le réchauffement local.
<b><math>\alpha</math>-Multifonctionnalité (diversité des services écosystémiques)</b>	Mesure du nombre de services écosystémiques différents (tels que la production agricole, la pollinisation et la régulation de l'eau) fournis dans la même zone ou unité. Elle montre la diversité des bénéfices tirés de la terre.
<b>Biodiversité</b>	La variété des espèces vivantes (plantes, animaux et microbes) dans une zone. Une biodiversité élevée favorise la santé des écosystèmes, la production agricole et la résistance aux parasites ou aux extrêmes climatiques.
<b>Séquestration du carbone</b>	Le piégeage du carbone dans l'agriculture fait référence au processus de capture et de stockage du dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) atmosphérique dans le sol et la végétation, transformant ainsi les terres agricoles en puits de carbone.
<b>Indice cumulé des services écosystémiques</b>	Un score spatial qui additionne plusieurs services écosystémiques en un seul endroit pour montrer où les bénéfices globaux de la nature sont les plus élevés.
<b>Services écosystémiques (ES)</b>	Les avantages que nous tirons de la nature, tels que l'eau propre, les sols fertiles, la pollinisation, la lutte contre les inondations et la régulation du climat.
<b>Fragmentation de l'habitat</b>	La fragmentation de vastes zones naturelles en parcelles plus petites et déconnectées les unes des autres. Cela peut réduire la capacité de la faune et des écosystèmes à prospérer.
<b>Points chauds</b>	Zones qui fournissent des niveaux très élevés de services écosystémiques. Dans ce rapport, les hotspots sont les 35 % du paysage qui fournissent les plus grands bénéfices environnementaux.
<b>Hétérogénéité du paysage</b>	Un paysage composé d'un mélange de différentes utilisations des terres et de caractéristiques naturelles (par exemple, des champs, des forêts, des zones humides). Les paysages hétérogènes soutiennent une plus large gamme de services écosystémiques.
<b>Intensification de l'utilisation des sols</b>	L'agriculture plus intensive consiste à augmenter la production (comme la production alimentaire) à partir d'une surface donnée, souvent en augmentant les intrants tels que les engrais ou en agrandissant la taille des champs. Cette pratique peut avoir des répercussions sur les systèmes naturels si elle n'est pas gérée avec précaution.
<b>Paysages gérés</b>	Zones où l'utilisation des sols est influencée par l'activité humaine, telles que les champs de culture ou les pâturages, souvent conçues pour soutenir à la fois la production et les services écosystémiques.
<b>Paysages multifonctionnels</b>	Des paysages qui soutiennent à la fois l'agriculture et la nature, en fournissant à la fois de la nourriture, des revenus et des services écosystémiques.
<b>Solutions naturelles pour le climat</b>	Les stratégies fondées sur la nature, telles que la protection des prairies, la restauration des zones humides ou la plantation de cultures de couverture, contribuent à réduire les gaz à effet de serre et à renforcer la résilience climatique.
<b>Contributions de la nature à l'homme (PCN)</b>	Un terme plus large pour les services écosystémiques, reconnaissant à la fois les avantages matériels et immatériels tels que l'éducation et les possibilités de loisirs que la nature offre aux humains.

<b>Pédo-paysage du Canada (PPC)</b>	<i>Un système cartographique national qui divise le Canada en unités de paysage basées sur le sol, la topographie et l'utilisation des terres. Il sert de base à l'aménagement du territoire dans le présent rapport.</i>
<b>Espèces en péril (EP)</b>	<i>Plantes ou animaux menacés de disparaître d'une partie ou de la totalité de leur aire de répartition. Dans les Prairies, de nombreuses espèces EP dépendent des prairies et des zones humides.</i>
<b>Optimisation spatiale</b>	<i>L'utilisation de données et de cartes pour trouver les meilleurs endroits où concentrer les actions de conservation ou de gestion des terres afin d'en tirer le meilleur parti.</i>
<b>Compromis et synergies</b>	<i>Il y a compromis lorsque l'amélioration d'un élément entraîne le déclin d'un autre. Il y a synergie lorsque deux objectifs, tels que l'agriculture et la conservation, sont bénéfiques l'un pour l'autre.</i>



Crédit photo : Ehsan Pashanejad, Prairies du Nord, été 2022

## Introduction

Les prairies canadiennes sont plus que des champs de blé, de canola et de bétail - ce sont des systèmes vivants dynamiques qui stockent le carbone, régulent l'eau et soutiennent la biodiversité essentielle à la productivité agricole et à la viabilité à long terme de la région. Ces services écosystémiques (SE) ou la contribution de la nature aux populations (NCP ; Díaz et al. 2018) fournissent des avantages essentiels qui soutiennent le bien-être humain, mais ils sont de plus en plus menacés par les pressions anthropiques telles que le changement d'utilisation des terres, la fragmentation de l'habitat et l'extraction des ressources. Au Canada, la valeur économique totale des contributions de la nature aux personnes est estimée à 3,6 billions de dollars par an (Molnar et al. 2021) . Pour l'agriculture des Prairies, cette valeur devient plus tangible : les prairies, par exemple, stockent de grandes quantités de carbone dans leurs vastes systèmes racinaires, ce qui fait de leur conservation une stratégie essentielle d'atténuation du changement climatique (Nebel et Cook 2024) . Des études (Olewiler 2004) montrent que la valeur économique de la conservation et de la restauration des habitats naturels dans les paysages agricoles au Canada varie entre 65 et 195 dollars par hectare et par an, grâce à des avantages tels que la rétention des nutriments, l'amélioration des rendements, la séquestration du carbone, la protection contre les inondations et de nombreux autres services et biens générés par des écosystèmes sains. Empêcher la conversion de ces habitats en terres cultivées ou en zones urbaines est l'une des solutions naturelles les plus efficaces pour lutter contre le changement climatique au Canada, avec la possibilité d'obtenir d'importants bénéfices en termes de séquestration du carbone au cours des prochaines années (Drever et al. 2021) .

Les prairies canadiennes illustrent le défi que représente l'équilibre entre les activités humaines, la conservation et la protection de la biodiversité et la résilience climatique. Les Prairies, l'un des paysages les plus modifiés du Canada, ont perdu plus de 70 % de leurs prairies indigènes au profit de l'expansion agricole. Malgré cette perte, la région reste essentielle pour la conservation de la biodiversité, car elle abrite un nombre important d'espèces en péril (SAR) ; il y a plus de 60 SAR répertoriées au niveau fédéral) et fournit des services écosystémiques essentiels tels que la séquestration du carbone, la régulation de l'eau et la pollinisation (Whitfield et al. 2024) . Pour relever ces défis, il est nécessaire d'adopter des approches de gestion des terres intégrées et fondées sur

Équilibrer l'agriculture et la conservation des Prairies canadiennes: Un cadre systémique pour naviguer les dynamiques spatiales des paysages agricoles

des données probantes, qui permettent de concilier des objectifs contradictoires. Des initiatives mondiales et nationales telles que le Cadre mondial pour la biodiversité Kunming-Montréal (KMGBF ; Diversity 2022) et la Stratégie nature 2030 du Canada (Environnement et changement climatique Canada 2024a) - fixent des objectifs ambitieux, notamment la protection de 30 % des terres et la restauration de 30 % des écosystèmes dégradés d'ici à 2030. Toutefois, la mise en pratique de ces objectifs sur les terres agricoles pose des problèmes de gouvernance et de mise en œuvre. Au Canada, l'agriculture relève de la compétence des provinces et nombre d'entre elles donnent la priorité à la croissance économique et à l'intensification de l'agriculture. Cela crée un décalage politique entre les engagements en faveur de la biodiversité et les décisions locales en matière d'utilisation des terres. Dans le même temps, ces cadres ouvrent de nouvelles perspectives - telles que les programmes d'incitation, les solutions fondées sur la nature et l'agriculture intelligente face au climat - qui peuvent aligner les objectifs de conservation sur la viabilité des exploitations si elles sont soutenues par une politique intergouvernementale cohérente et des partenariats solides avec les producteurs.

Ce rapport montre comment la nature et l'agriculture peuvent travailler ensemble sur les mêmes terres. À l'aide de cartes et de données spatiales telles que les couches d'occupation et d'utilisation des sols, il identifie les zones des prairies canadiennes où les systèmes naturels, tels que les prairies et les zones humides, offrent encore des avantages importants pour la productivité des cultures, comme l'habitat des pollinisateurs, la rétention des nutriments, le stockage du carbone et le contrôle de l'érosion des sols, tout en restant compatibles avec une exploitation agricole productive. Cela est particulièrement essentiel pour assurer le fonctionnement et la résilience des agroécosystèmes. Bien que l'évaluation de la résilience soit intrinsèquement complexe, le message est simple : le maintien d'un mélange d'utilisations des terres et de caractéristiques naturelles - connu sous le nom d'hétérogénéité du paysage - soutient les fonctions multiples des écosystèmes et leur connectivité. Cela permet aux agriculteurs de s'adapter aux effets du climat tout en restant productifs à long terme. En identifiant les points critiques pour une gestion ciblée, cette approche fournit des informations précieuses sur la réalisation de paysages multifonctionnels qui équilibrent les objectifs de conservation, de production et de résilience, contribuant ainsi à une planification plus durable de l'utilisation des terres et à une connectivité écologique plus forte.

## Contexte

### Le rôle des prairies canadiennes dans la fourniture de services écosystémiques et la productivité agricole

S'étendant sur l'Alberta, la Saskatchewan et le Manitoba, les Prairies canadiennes forment l'épine dorsale du paysage agricole du pays, représentant plus de 80 % des terres agricoles cultivées du Canada. Cette région fait partie intégrante de l'économie canadienne, contribuant à hauteur de 21,6 % au PIB national en 2020 et ayant connu une croissance du PIB de 340 % au cours des trois dernières décennies (Gouvernement du Canada 2021) . Bien que l'agriculture représente une part plus faible de ce total, elle joue un rôle crucial dans la sécurité alimentaire et la gestion durable des terres. La région des Prairies est un producteur clé de blé, de canola, de bovins et de porcs, générant environ 29,7 milliards de dollars rien que pour ces quatre produits, ce qui représente la grande majorité (environ 65,2 %) du revenu agricole total du Canada dans ces secteurs (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2024) .



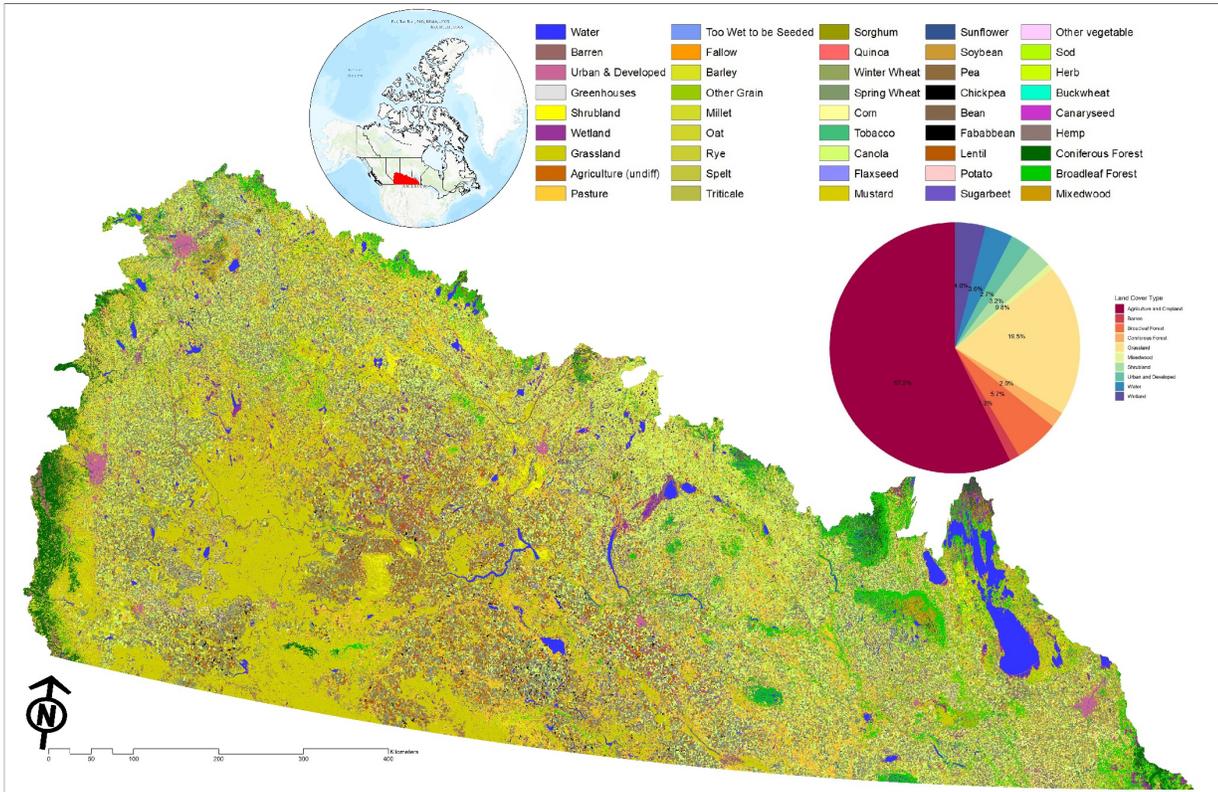


Figure 1. **Situation géographique de la zone d'étude et carte de l'occupation et de l'utilisation des sols dans les Prairies canadiennes**, mettant en évidence la transformation du paysage depuis les montagnes Rocheuses en Alberta (à l'ouest) jusqu'au Manitoba (à l'est). Les prairies dominent environ 20 % du paysage, principalement dans les parties méridionales et centrales de l'Alberta et de la Saskatchewan. Les forêts de conifères sont concentrées le long de la bordure ouest de l'Alberta, près de la limite de la zone d'étude. Les activités agricoles et les terres cultivées constituent le type d'utilisation des sols le plus étendu, représentant plus de 50 % (y compris les cultures annuelles et pérennes) de la superficie totale. Les données sur l'occupation des sols proviennent de l'inventaire annuel des cultures de 2020 produit par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC).

Malgré l'importance économique de l'agriculture dans les prairies, l'augmentation de l'intensité de l'utilisation des terres - comme l'extension de la taille des champs, la suppression des habitats naturels et des zones tampons, le drainage des zones humides et la conversion des terres marginales - a conduit à une dégradation significative de l'environnement. Le drainage des zones humides et la conversion des prairies ont perturbé l'écoulement de l'eau, réduit la qualité de l'eau et accéléré la perte de biodiversité dans toute la région (Baulch et al. 2021) . Alors que les facteurs naturels ont historiquement façonné l'écosystème des prairies, notamment les feux de forêt périodiques et la présence de bisons (*Bison bison*), les pratiques actuelles d'utilisation des terres, notamment le pâturage du bétail et les cultures à grande échelle, ainsi que le développement des infrastructures sont les forces dominantes qui influencent à la fois les pratiques agricoles et la santé écologique. (Paterson et al. 2024) . Même si certaines pratiques, comme le pâturage du bétail, ont toujours été considérées comme des facteurs de changement écologique, les recherches émergentes et les efforts de collaboration reconnaissent de plus en plus qu'un pâturage bien géré peut contribuer à maintenir la biodiversité des prairies et remplacer certaines des fonctions écologiques autrefois assurées par les bisons. Néanmoins, la perte continue et historique d'habitats naturels reste l'un des principaux facteurs de déclin de la biodiversité dans cette écozone (Bartzen et al. 2010 ; Olimb et Robinson 2019) .

## Gestion multifonctionnelle des terres pour des paysages résilients

La gestion multifonctionnelle des terres consiste à concevoir et à gérer les paysages de manière à obtenir des résultats multiples à partir d'une même zone de terre. Cette approche gagne du terrain dans la gestion des terres en tant que stratégie permettant d'équilibrer la productivité agricole et la durabilité des écosystèmes dans des

Équilibrer l'agriculture et la conservation des Prairies canadiennes: Un cadre systémique pour naviguer les dynamiques spatiales des paysages agricoles

régions telles que les prairies canadiennes. Si la spécialisation et l'homogénéisation à grande échelle des systèmes de production (Nyström et al. 2019) peuvent maximiser la productivité à court terme (Peterson, Eviner et Gaudin 2018), elles entraînent souvent des externalités environnementales telles que la dégradation des sols, la perte de biodiversité et la diminution de la résilience (Frei et al. 2020). En revanche, les paysages multifonctionnels, où la productivité agricole coexiste avec la fonctionnalité des écosystèmes, peuvent fournir une série d'avantages, notamment le stockage du carbone dans le sol, la pollinisation, la régulation de la qualité de l'eau et les services récréatifs. La recherche suggère que les paysages présentant une plus grande multifonctionnalité soutiennent à la fois la diversité agricole et biologique, favorisant la résilience à travers les échelles spatiales et temporelles (Gaba et Bretagnolle 2020). Toutefois, il est essentiel d'adopter un point de vue socio-écologique pour comprendre les mécanismes qui permettent la multifonctionnalité. En alignant les pratiques d'utilisation des terres sur les processus écologiques, il est possible de créer des synergies qui renforcent la sécurité alimentaire et les moyens de subsistance des agriculteurs tout en assurant la conservation de la biodiversité.

## Résultats

### Points chauds de la multifonctionnalité des services écosystémiques

Notre analyse montre qu'une part relativement faible du paysage des prairies - seulement 19 % - fournit la majorité des services écosystémiques clés tels que la pollinisation, le contrôle de l'érosion des sols et la qualité de l'habitat. Ces zones très performantes, ou "points chauds", jouent un rôle essentiel dans le maintien des systèmes naturels qui soutiennent l'agriculture. Par exemple, elles contribuent pour environ 57 % au contrôle de l'érosion des sols, 57 % à la qualité de l'habitat et 42 % aux services de pollinisation, ce qui souligne leur rôle essentiel dans le maintien des fonctions de l'écosystème. Il convient de mentionner que la partie restante du paysage (qui n'est pas reconnue comme un point chaud de SE) soutient la majorité du stockage du carbone, de la rétention des nutriments et de la productivité des cultures (~ 98%), ce qui souligne l'importance d'une gestion plus large à l'échelle du paysage pour maintenir ces services (tableau 1). Au sein de ces zones à haute valeur ajoutée, les prairies dominent le paysage multifonctionnel, représentant plus de la moitié des 35 % de zones les plus importantes, ce qui souligne leur rôle significatif dans le maintien des fonctions des écosystèmes et de la biodiversité. De même, les zones humides et les zones arbustives contribuent de manière significative à la régulation de l'eau, au stockage du carbone et à la qualité de l'habitat. Les types de terres forestières (dicotylédones, conifères et forêts mixtes) représentent collectivement environ 23 % des principales zones multifonctionnelles, ce qui indique le rôle essentiel du maintien des parcelles forestières dans la préservation des services écosystémiques des prairies. Les zones agricoles et les terres cultivées, en revanche, ne couvrent qu'une petite fraction de la zone cumulative (qui additionne les valeurs normalisées des SE par unité ; voir Méthodes) d'approvisionnement en SE, tout en couvrant une vaste zone du paysage des prairies (Figure 3). Nos résultats démontrent que les paysages et les écosystèmes naturels, et en particulier les zones humides et les prairies, sont des contributeurs essentiels à la fourniture de services écosystémiques dans les prairies (voir le diagramme en boîte, panneau c de la figure 3).

En pratique, l'indice cumulatif de fourniture de services écosystémiques identifie les zones où des investissements ciblés en matière de conservation, tels que la protection des prairies indigènes ou la restauration des zones humides, peuvent produire les rendements les plus élevés en termes de fourniture totale de services écosystémiques. Il s'agit de zones prioritaires pour la conservation des services écosystémiques, où des efforts ciblés tels que la protection des habitats, la restauration écologique ou les incitations agro-environnementales peuvent apporter des bénéfices écologiques disproportionnés. Par exemple, Baulch et al. (2021) soulignent le rôle essentiel de la restauration des zones humides dans l'amélioration de la qualité de l'eau et de la rétention des nutriments, ce qui renforce la valeur de la conservation des paysages riches en SE. L'identification et la sauvegarde de ces zones sont essentielles pour aligner la planification de l'utilisation des terres agricoles sur les objectifs plus larges du Canada en matière de biodiversité et de climat. À l'inverse, l'indice de diversité des SE ( $\alpha$ -multifonctionnalité ; voir Méthodes) offre des perspectives différentes rendant compte de la diversité des SE par unité de surface, indépendamment de leur ampleur. Cet indice révèle en fait où les unités d'approvisionnement en SE de grande valeur ou les pixels sur la carte sont plus dispersés dans l'espace et sont déterminés par diverses utilisations des terres et types de couverture plutôt que par un seul service dominant. Bien qu'ils ne soient pas les

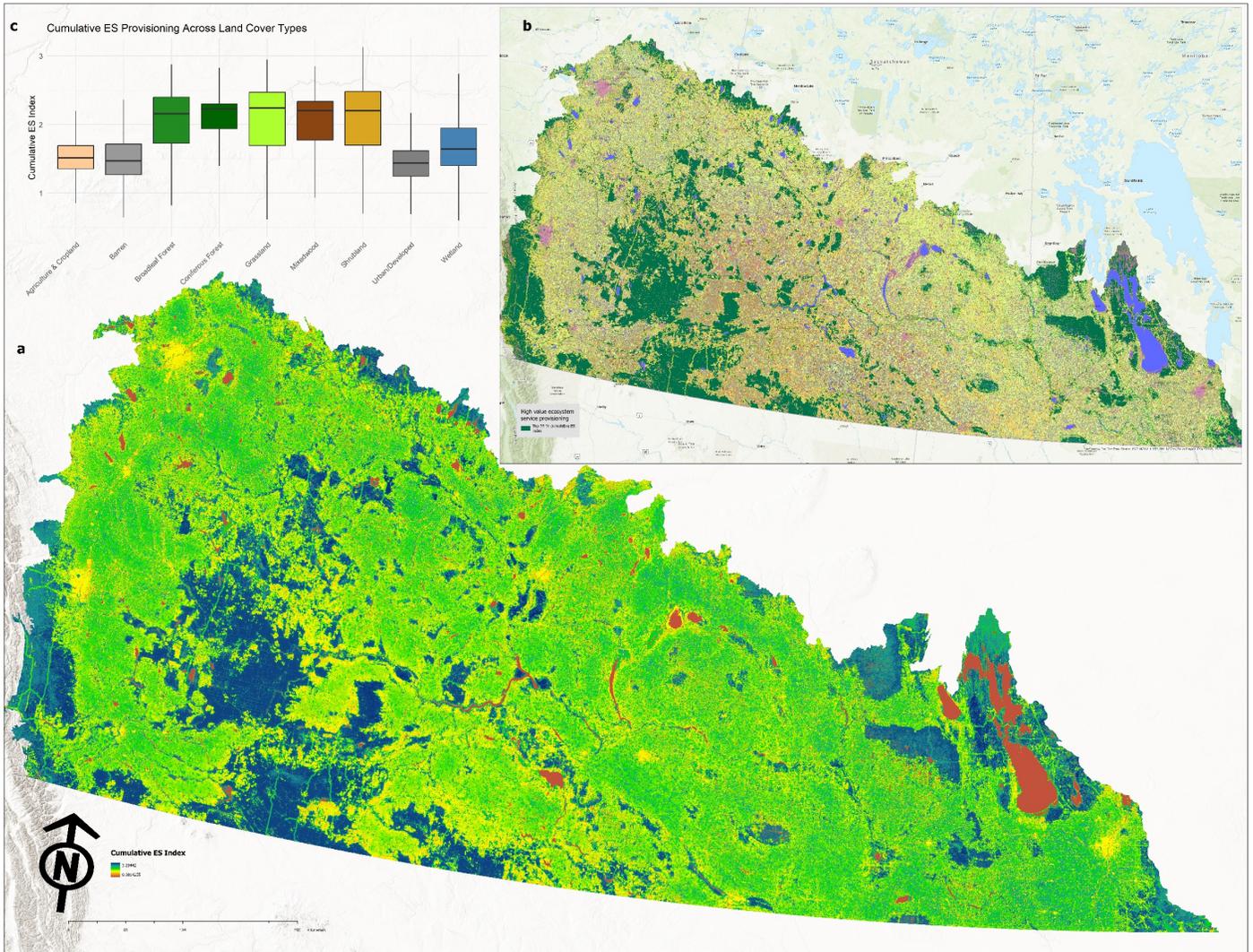
mieux classés en termes de fourniture totale de services, ces paysages offrent une occasion unique de soutenir simultanément plusieurs objectifs, notamment la production alimentaire, la régulation du climat et la conservation de la biodiversité. Cela en fait des candidats idéaux pour les stratégies de gestion intégrée des terres. Par exemple, l'adoption de zones tampons ripariennes et de pratiques agroforestières s'est révélée prometteuse pour améliorer la diversité des services tout en maintenant la viabilité de l'agriculture. Rallings et al. (2019) démontrent que la mise en œuvre de zones tampons ripariennes et de haies dans des paysages d'agriculture intensive comme la vallée du bas Fraser en Colombie-Britannique peut renforcer la multifonctionnalité du paysage, en améliorant la connectivité des habitats et les services écosystémiques tout en minimisant la perte de terres agricoles productives.

Nous avons analysé la diversité de l'approvisionnement en SE dans les prairies selon deux scénarios : d'une part, nous avons exploré la variabilité de l'indice dans les paysages naturels en l'absence de terres cultivées (figure 4, panneaux a et c) et, d'autre part, nous avons exploré la diversité des SE dans les paysages aménagés comprenant des terres cultivées. Il est intéressant de noter que les terres cultivées jouent un rôle important dans la multifonctionnalité  $\alpha$  en raison de l'inclusion de la productivité des cultures, de la rétention des nutriments, du contrôle de l'érosion des sols et, dans certains cas, d'un niveau modéré de séquestration du carbone lorsqu'elles ont été incluses dans le calcul de l'indice (figure 4, panneau b). Les diagrammes en boîte indiquent que la diversité des SE tend à être plus élevée dans les zones humides, les prairies et les forêts dans le premier scénario (panneau c, figure 4), tandis que le panneau f (figure 4) met en évidence le rôle substantiel de l'agriculture et de l'approvisionnement des cultures qui contribuent à la diversité globale des SE (indice  $\alpha$ -multifonctionnalité). Notamment, les paysages agricoles présentent une diversité élevée en raison des services d'approvisionnement intensifs qui peuvent éclipser la diversité des systèmes naturels. Les paysages dominés par la forêt, comme ceux de la partie occidentale de la zone d'étude, ou les prairies naturelles dans des endroits comme le centre de l'Alberta, dominent les points chauds cumulatifs des SE et semblent moins importants dans l'indice  $\alpha$ -multifonctionnalité en raison de la plus faible diversité des types de services par pixel, qui est également due à l'hétérogénéité du paysage.

Tableau 1 . Analyse de la fourniture de services écosystémiques dans les 35 % de zones de multifonctionnalité les plus importantes des Prairies canadiennes. Ces zones, identifiées sur la base de l'indice cumulatif des services écosystémiques, contribuent de manière disproportionnée à la fourniture de services écosystémiques à l'échelle du paysage.

Service écosystémique	Catégorie	Superficie (km <sup>2</sup> )	Valeur moyenne (par pixel)	Contribution au total des ES (%)
Pollinisation	Top 35% des points chauds	10,626	0.744	41.94
	65% restants	43,662	0.251	58.06
Stockage du carbone	Top 35% des points chauds	10,626	0.582	21.74
	65% restants	43,662	0.664	78.26
Rétention des nutriments	Top 35% des points chauds	10,626	0.034	5.11
	65% restants	43,662	0.154	94.89
Qualité de l'habitat	Top 35% des points chauds	10,626	0.945	56.96
	65% restants	43,662	0.174	43.04
Érosion évitée	Top 35% des points chauds	10,626	0.002	57.34
	65% restants	43,662	0.0004	42.66
Productivité des cultures	Top 35% des points chauds	1,179,659	0.0195	1.46
	65% restants	4,850,107	0.321	98.54





**Figure 2 . Représentation spatiale et statistique de la fourniture cumulative de services écosystémiques dans les prairies canadiennes.** **Panneau (a) :** Distribution spatiale de l'indice cumulatif des SE. L'intensité de la couleur bleue représente les zones présentant des valeurs de SE cumulées plus élevées, ce qui indique des zones de fourniture élevée de services écosystémiques. Les points chauds des SE cumulés sont représentés dans le **panneau (b)** **Panneau (c) :** Diagramme en boîte de l'offre cumulative de SE en fonction des types de couverture terrestre, illustrant la contribution des différentes classes de couverture terrestre à l'offre cumulative de SE. Les écosystèmes naturels (par exemple, les zones humides, les prairies, les forêts) présentent des contributions en SE plus élevées que les zones agricoles et urbaines, ce qui reflète leur rôle essentiel dans le maintien de la fonctionnalité des écosystèmes. Les 35 % de points chauds les plus importants en matière de SE offrent une approche ciblée pour la priorisation de la conservation, garantissant la préservation des paysages à haute fonctionnalité.

Tableau 2 . Composition de l'occupation du sol dans les 35 % de zones de multifonctionnalité à haute valeur ajoutée. Types d'occupation du sol dans les 35 % de zones de multifonctionnalité les plus importantes, mettant en évidence les principaux contributeurs à la fourniture de services écosystémiques.

Type de couverture terrestre	Superficie (km <sup>2</sup> ) en multifonctionnalité ES	Superficie totale du paysage	% du total des zones ES	Proportion du type de couverture terrestre dans les 35 % supérieurs par rapport
------------------------------	---	------------------------------	-------------------------	---



				à l'ensemble du paysage (%)
L'eau	741.15	19514.44	0.70	3.80
Terrain exposé/Barren	957.6	7277.545	0.90	13.16
Urbain/développé	568.44	14546.11	0.53	3.91
Arbustes	9085.95	17553.64	8.55	51.76
Zone humide	3458.52	21564.31	3.25	16.04
Prairies	62080.29	106137.8	58.42	58.49
Pâturage	2876.04	49427.69	2.71	5.82
Agriculture et terres cultivées	1342.17	262946.4	1.26	0.51
Conifères	6430.86	11110.12	6.05	57.88
Feuilles larges	16086.24	31079	15.14	51.76
Bois mixte	2631.6	4495.4	2.48	58.54
Total	<b>106258.86</b>	<b>545652.4</b>	<b>100</b>	<b>19.47</b>

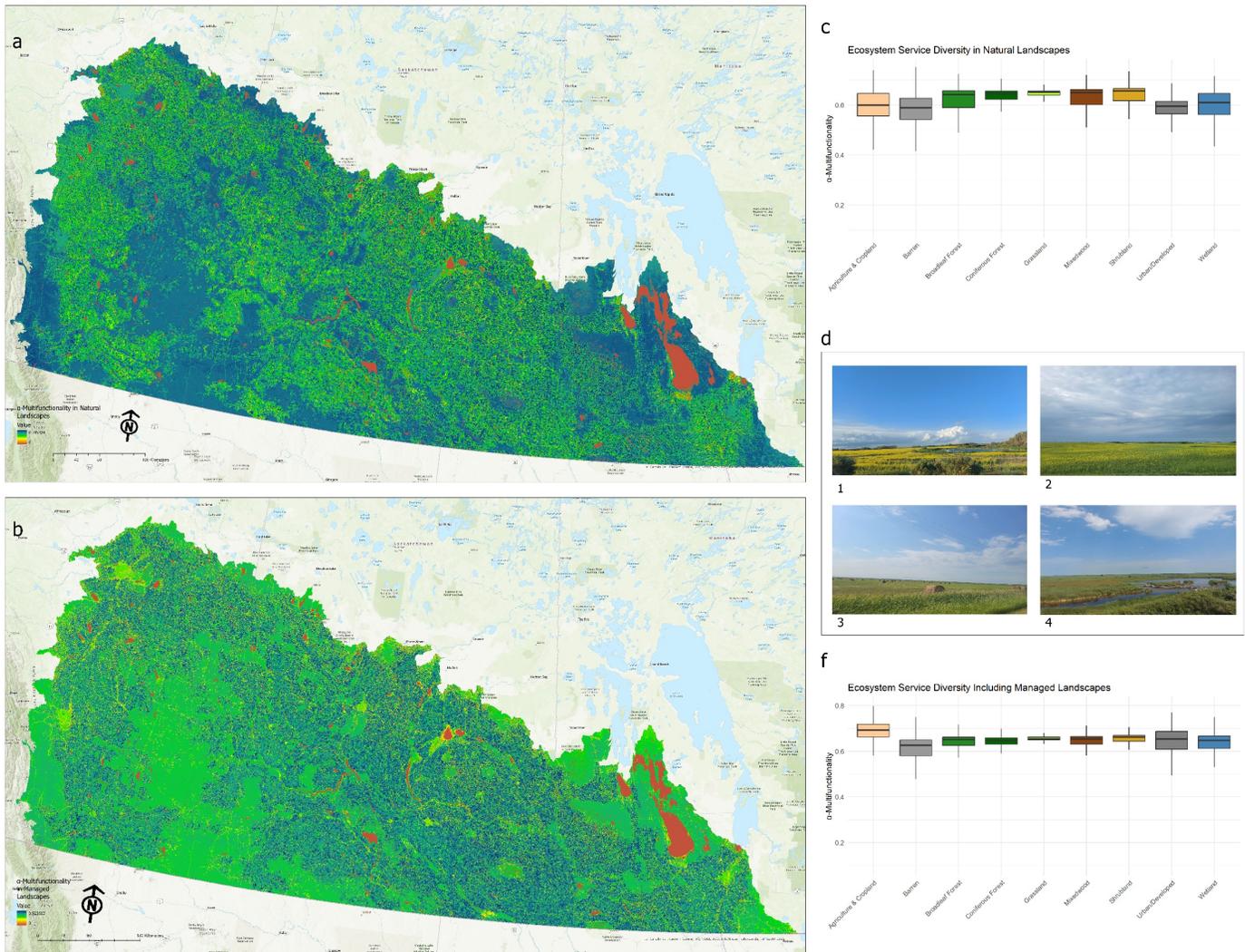


Figure 3. Schémas spatiaux et analyse statistique de la diversité des services écosystémiques représentés par les indices  $\alpha$ -Multifonctionnalité dans les Prairies canadiennes selon deux scénarios. (a) paysages naturels et (b) paysages gérés, y compris les terres cultivées. (c) Diagrammes en boîte illustrant l' $\alpha$ -multifonctionnalité (diversité des SE) dans les paysages naturels à travers les principaux types de couverture terrestre. (f)

Diagrammes en boîte de la diversité des SE dans les paysages gérés, mettant en évidence l'influence de l'agriculture et des terres cultivées sur les schémas de diversité des SE. (d) Les photographies de terrain prises au cours d'une excursion à l'été 2022 illustrent les principaux types de paysages : (1) & (2) zones dominées par les terres cultivées avec un habitat naturel à l'intérieur de la mosaïque agricole, (3) zones de transition entre les prairies et les terres cultivées et prairies gérées, et (4) habitats de zones humides (marais Oak Hammock, Manitoba).

## Interactions spatiales de la multifonctionnalité cumulative avec la diversité des SE ( $\alpha$ -multifonctionnalité)

La figure 4 illustre le chevauchement spatial entre l'offre cumulative de SE et l'indice  $\alpha$ -multifonctionnalité basé sur le scénario des paysages gérés. Cette carte bivariable met en évidence des points névralgiques où l'offre globale de SE et la diversité des services se rencontrent. Elle constitue un outil d'aide à la décision permettant d'identifier les synergies et les compromis dans la gestion des paysages. Ces zones fonctionnent comme des paysages à double avantage, fournissant de multiples services écosystémiques tout en maintenant la productivité des terres. La relation synergique représente des zones stratégiques d'alignement où les objectifs écologiques et agricoles se renforcent mutuellement. Ces zones sont essentielles pour faire progresser les engagements du Canada en matière de biodiversité, de résilience climatique et de systèmes alimentaires durables. D'un point de vue politique, ces paysages offrent des opportunités à fort impact, où des investissements ciblés dans la conservation ou les programmes agro-environnementaux peuvent produire les plus grands bénéfices conjoints dans de multiples secteurs. En d'autres termes, il s'agit d'endroits où la protection de la nature soutient également les terres productives - la meilleure occasion pour le Canada de faire les deux.

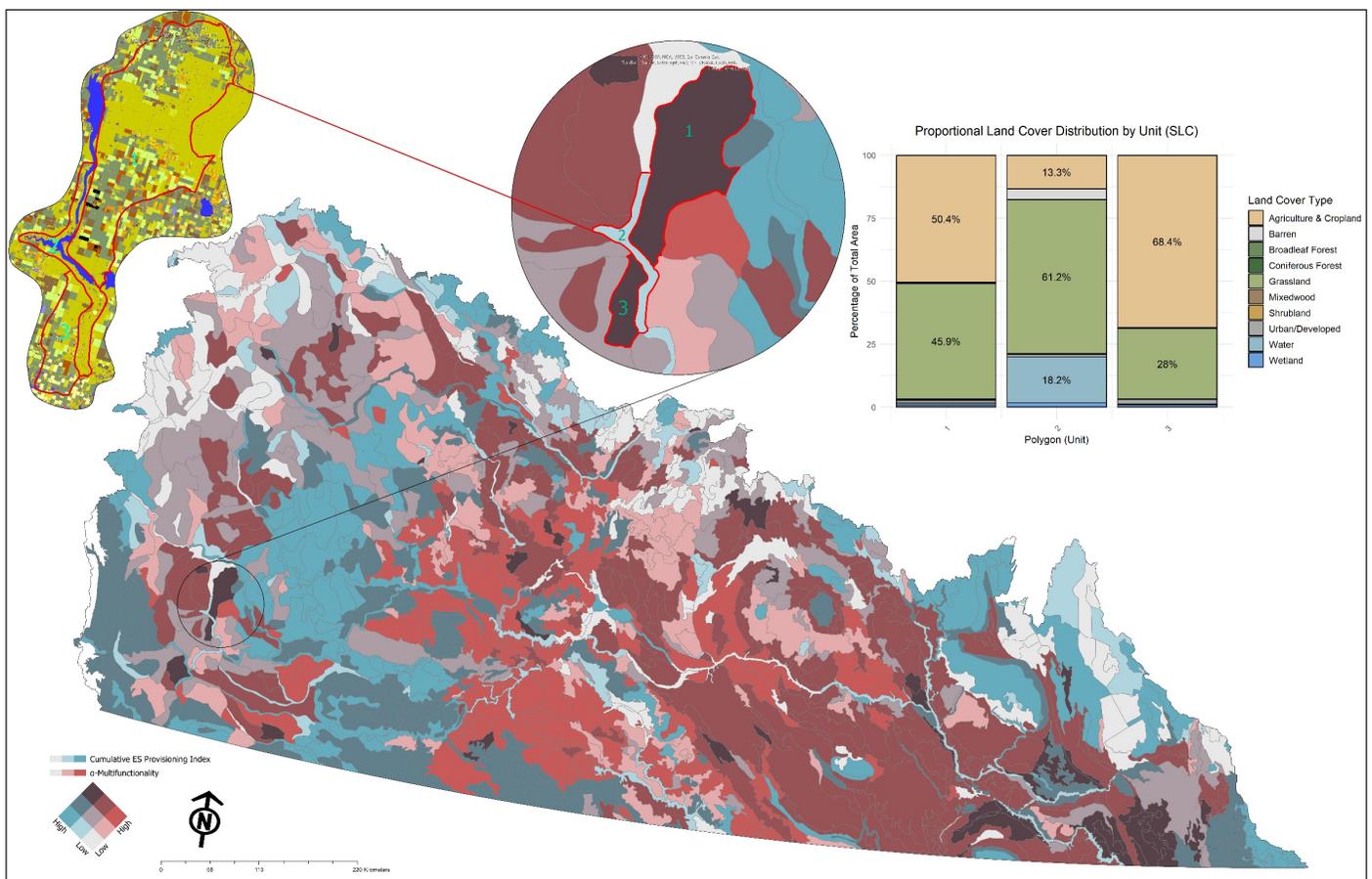


Figure 4 . Carte bivariable de l'indice cumulatif de fourniture de services écosystémiques (SE) et de l'indice  $\alpha$ -multifonctionnalité, agrégés par unités de pédo-paysage du Canada (PPC) dans le cadre d'un scénario de l'équilibre entre l'agriculture et la conservation des prairies canadiennes: Un cadre systémique pour naviguer les dynamiques spatiales des paysages agricoles

paysages gérés. Les zones présentant des SE cumulatifs élevés (bleu clair) et une multifonctionnalité élevée (rouge clair) sont représentées séparément, tandis que les zones violettes qui se chevauchent indiquent les régions où les deux indices sont élevés. Un diagramme à barres empilées complémentaire illustre la répartition de l'occupation et de l'utilisation des sols au sein de certaines unités des PPC. Notamment, les unités 1 et 3 présentent un mélange équilibré d'habitats naturels et d'autres utilisations des terres - l'unité 3 ayant au moins 30 % de couverture terrestre naturelle et l'unité 1 plus de 45 % - ce qui démontre l'harmonisation entre la diversité du paysage et l'approvisionnement en SE. En revanche, l'unité 2, malgré des SE cumulés élevés, est dominée par une couverture terrestre naturelle (61,2 % de prairies) avec une présence agricole minimale (13,3 %), ce qui met en évidence les compromis inhérents à la gestion multifonctionnelle des paysages.

Nos résultats soulignent que les écosystèmes naturels, tels que les prairies et les zones humides, dominent les zones de fourniture de services écosystémiques de grande valeur, ce qui met en évidence leur rôle essentiel dans le maintien de la biodiversité et des fonctions des écosystèmes. Cette constatation est confirmée par une étude similaire menée dans les Prairies par Paterson et al. (2024) qui démontrent que le maintien d'un minimum de 20 % d'habitats naturels dans les paysages agricoles peut sauvegarder une part substantielle de la biodiversité régionale. Ces résultats suggèrent qu'une configuration efficace du paysage est étroitement liée à l'amélioration de la fourniture de services écosystémiques dans les paysages multifonctionnels. En outre, les approches ascendantes, telles que l'adoption de meilleures pratiques de gestion dans les exploitations agricoles, peuvent stimuler de manière significative à la fois la productivité et la conservation, fournissant ainsi de multiples services écosystémiques. Par exemple, il a été démontré que la réduction des engrais et la diminution de la fréquence de fauchage améliorent les SE culturels et régulateurs tels que la conservation de la biodiversité et la rétention de l'azote (Richter et al. 2024). Des études ont également montré que l'intégration des haies et des zones tampons ripariennes dans les paysages agricoles maximise la multifonctionnalité en s'attaquant aux compromis entre les services écosystémiques, la conservation de la biodiversité et la production agricole. Toutefois, pour parvenir à cet équilibre, il faut une planification stratégique, comprendre le comportement des agriculteurs et mettre en place des incitations politiques pour compenser les coûts d'opportunité de la réaffectation des terres productives (Rallings et al., 2019).

L'évaluation de la multifonctionnalité de la fourniture de services écosystémiques dans les prairies canadiennes est une première étape cruciale dans l'exploration des moyens d'atténuer les compromis entre les systèmes de conservation et de production intensive, d'autant plus que cette région contribue de manière significative à la production agricole du pays, représentant plus de 20 % du PIB national, tous secteurs confondus. Des études antérieures ont souligné le rôle essentiel des paysages multifonctionnels dans le maintien de la contribution de la nature à l'échelle mondiale (Chaplin-Kramer et al. 2022 ; Neugarten et al. 2024), mais la présente étude fait progresser cette compréhension en localisant la multifonctionnalité des services écosystémiques. En utilisant des indices spatiaux, tels que la diversité des services écosystémiques ( $\alpha$ -multifonctionnalité ; (Simion et al. 2023)), et en intégrant la cartographie des SE, nous fournissons un cadre d'orientation pour les décideurs politiques et les gestionnaires de paysage afin d'identifier les compromis et les synergies dans les agroécosystèmes. Ces outils analytiques ouvrent la voie à des interventions plus ciblées - telles que le développement de modèles d'optimisation spatiale et d'analyses basées sur des scénarios pour délimiter des configurations spécifiques d'utilisation des terres qui maximisent les services écosystémiques individuels tout en quantifiant les seuils au-delà desquels l'intensification peut compromettre la biodiversité, et par le biais d'une cartographie détaillée des points chauds des services écosystémiques afin d'identifier les zones prioritaires pour la conservation qui complètent la production agricole. Nous reconnaissons que ces stratégies représentent des voies d'intervention générales ; les analyses futures devraient intégrer de manière plus approfondie les besoins et les valeurs des différentes parties prenantes, des détenteurs de droits et des propriétaires fonciers dans le processus de prise de décision et d'optimisation, en veillant à ce que diverses perspectives soient prises en compte dans l'alignement des objectifs mondiaux en matière de biodiversité avec les demandes locales et nationales en matière de production alimentaire et en permettant de cibler les interventions en tenant compte du comportement individuel des agriculteurs et des différences régionales.

Les indices spatiaux, adaptés aux évaluations à l'échelle du paysage, s'alignent sur le concept de dépendance d'échelle dans les évaluations de la multifonctionnalité en agrégeant la fourniture de services écosystémiques dans les pédopaysages du Canada en tant qu'unités de planification potentielles, offrant ainsi une perspective régionale sur la multifonctionnalité. La mesure de l'approvisionnement cumulatif en SE représente une

multifonctionnalité basée sur le modèle en identifiant les points chauds spatiaux de l'approvisionnement en services, tandis que l' $\alpha$ -multifonctionnalité fait le lien avec une multifonctionnalité basée sur le processus en capturant la diversité des services et leurs interactions écologiques, reflétant la complexité au sein des unités paysagères. En intégrant l' $\alpha$ -multifonctionnalité aux analyses de compromis, nous explorons l'existence de relations fonctionnelles entre les systèmes de production et la conservation, ce qui permet de comprendre comment les différents SE interagissent.

Dans cette étude, nous avons combiné des indices spatiaux de multifonctionnalité pour explorer la diversité des services écosystémiques et la capacité du paysage à fournir des services multiples. Cela nous a permis d'étudier comment les différents types d'occupation et d'utilisation des sols contribuent à la fourniture équilibrée de services au sein d'une unité (PPC, voir la figure 4 et la carte en médaillon de la configuration de l'occupation des sols dans trois unités sélectionnées de manière aléatoire). L'analyse de la composition de l'occupation des sols dans les zones multifonctionnelles SE indique le rôle critique des habitats naturels dans les paysages agricoles, avec plus de 50 % de ces zones - comprenant des arbustes, des prairies et divers types de forêts - contribuant de manière significative à la fourniture de services écosystémiques de grande valeur, tels qu'identifiés dans les 35 % supérieurs par l'indice SE cumulé.

En utilisant des mesures de multifonctionnalité, nous avons identifié les zones ayant la plus grande capacité globale en matière de SE et les régions où les fonctions de production et les fonctions écologiques se croisent. Alors que l'indice d'approvisionnement cumulatif en SE identifie les zones ayant la plus grande capacité à fournir des SE et indique l'offre totale de tous les SE dans une unité donnée, l' $\alpha$ -multifonctionnalité met en évidence les régions où divers ensembles de SE coexistent. Dans notre analyse, chaque service a été traité avec le même poids, ce qui signifie que cet indice capture la diversité des services plutôt que de donner la priorité à un type plutôt qu'à un autre. Toutefois, dans la pratique, l'importance de ces services peut varier en fonction de la région ou de l'objectif. Cet indice sert de point de départ à l'identification des zones multifonctionnelles susceptibles de soutenir à la fois la conservation et l'agriculture, et peut être affiné en fonction des priorités locales ou des besoins politiques. L'analyse a également révélé que les régions présentant une grande diversité de SE sont souvent confrontées à des demandes concurrentes entre les objectifs de conservation et de production.

Afin d'éclairer efficacement les décisions politiques, nous avons utilisé deux scénarios analytiques pour évaluer la diversité des services écosystémiques ( $\alpha$ -multifonctionnalité). Les scénarios ont été explicitement sélectionnés pour démontrer comment la gestion agricole influence la multifonctionnalité des paysages : (1) Paysages naturels - évalue la diversité des services écosystémiques sans utilisation des terres agricoles, mettant en évidence le potentiel de multifonctionnalité inhérent aux écosystèmes naturels. Ce scénario permet d'éclairer les décisions politiques sur les endroits où la conservation et la restauration peuvent fournir des services écosystémiques importants indépendamment de la gestion agricole. (2) Paysages gérés - incorpore les terres agricoles dans l'analyse, saisissant le rôle que joue l'agriculture dans la fourniture de services d'approvisionnement clés (tels que la productivité des cultures) ainsi que de services de régulation et de soutien. Ce scénario fournit aux décideurs politiques des informations réalistes sur la gestion des paysages où l'agriculture fait partie intégrante des économies locales et des moyens de subsistance des agriculteurs. Il est important de noter que ces scénarios ne sont pas censés représenter les politiques extrêmes (c'est-à-dire la conservation complète ou l'homogénéisation agricole à grande échelle). Au contraire, ils offrent des perspectives complémentaires qui permettent une compréhension équilibrée des objectifs de conservation et de la productivité agricole dans les paysages multifonctionnels. En adoptant une approche transformatrice, nous suggérons que les compromis associés à l'agriculture peuvent être atténués par l'adoption de pratiques agricoles efficaces, durables et résilientes, qui nécessiteront des interventions différentes en fonction des préférences de chaque agriculteur. Si cette approche peut séduire les adeptes de la première heure, nous reconnaissons que certains agriculteurs peuvent être plus hésitants à changer. La flexibilité est donc essentielle non seulement pour soutenir l'innovation chez les producteurs tournés vers l'avenir, mais aussi pour veiller à ce que la conception des politiques reste inclusive et réponde à des besoins divers. Une politique rationnelle en faveur des paysages agricoles durables devrait aligner les engagements nationaux en matière de biodiversité et de conservation sur les réalités de terrain des diverses communautés agricoles du Canada.

Étant donné que la sécurité alimentaire du Canada dépend fortement de l'agroécosystème des prairies, ces paysages devraient être reconnus comme des opportunités stratégiques pour renforcer la sécurité alimentaire tout en faisant progresser les efforts d'atténuation du climat et de conservation de la biodiversité. Par exemple,

Équilibrer l'agriculture et la conservation des Prairies canadiennes: Un cadre systémique pour naviguer les dynamiques spatiales des paysages agricoles

les recherches menées dans les prairies canadiennes ont montré que les pratiques de gestion des terres agricoles peuvent modifier de manière significative l'albédo de surface - défini comme la fraction du rayonnement solaire entrant réfléchi par la surface de la Terre - qui à son tour influence les modèles climatiques locaux, l'équilibre énergétique et le forçage radiatif. Les études menées par Liu et al. (2021, 2022) indiquent que le remplacement de la jachère par des cultures de couverture et l'adoption d'un travail réduit du sol peuvent renforcer les effets d'atténuation du changement climatique. Sur une période de 50 ans, le passage du travail du sol conventionnel à l'agriculture sans travail a entraîné une réduction de l'équivalent CO<sub>2</sub> de 1,0 à 1,5 kg m<sup>-2</sup>, tandis que le remplacement de la jachère par des cultures à croissance active a entraîné une réduction de 1,1 à 2,4 kg m<sup>-2</sup>. En outre, le choix du type de culture joue également un rôle dans la modulation de l'albédo. Par exemple, l'expansion des cultures annuelles telles que les lentilles, les pois et le canola - connues pour leur plus grande réflectivité de surface par rapport aux cultures céréalières comme le blé et le lin - peut contribuer à augmenter le refroidissement radiatif régional (Liu et al. 2022). Des études similaires menées aux États-Unis et en Europe ont démontré que les stratégies de gestion, y compris la pérennisation, peuvent améliorer la réflectivité de la surface et fournir des services écosystémiques supplémentaires tels que la rétention des nutriments et la séquestration du carbone (McDaniel et al. 2023 ; Scott et al. 2022 ; Shang et al. 2024). Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que les pratiques stratégiques de gestion des terres - telles que la pérennisation, le travail de conservation et la réduction de la jachère - peuvent produire des co-bénéfices pour la séquestration du carbone dans le sol et l'atténuation du climat en augmentant simultanément l'albédo de la surface. Cette approche à double avantage souligne la nécessité de politiques favorisant des régimes de gestion adaptatifs et intégrés afin de concilier les objectifs de productivité agricole et de durabilité environnementale.

## Implications politiques

Les prairies canadiennes ne sont pas seulement le grenier du Canada pour nous nourrir, elles sont aussi l'une des opportunités et l'un des outils naturels du Canada pour l'action climatique et la protection de la biodiversité. Toutefois, la réalisation de ce double potentiel dépend de la préservation des écosystèmes qui sous-tendent à la fois la productivité agricole et la résilience environnementale. Les agroécosystèmes des Prairies abritent un large éventail de services écosystémiques, allant du stockage du carbone et de la régulation de l'eau à la pollinisation et à la rétention des sols, qui soutiennent la production alimentaire et la stabilité du climat. Il convient de mentionner qu'une conservation efficace dans cette région nécessite des efforts coordonnés entre les gouvernements fédéral, provinciaux et locaux et les communautés autochtones, en particulier dans le cadre du système de gouvernance du Canada où la compétence sur les terres et les ressources naturelles est partagée. Alors que les cadres fédéraux tels que la Loi sur les espèces en péril (LEP) fixent des objectifs nationaux, la mise en œuvre dépend souvent de la coopération provinciale, ce qui crée à la fois des opportunités et des défis. Par exemple, le Plan conjoint pour l'habitat des Prairies et les plans d'action provinciaux pour la conservation des prairies (PCAP) offrent des modèles encourageants de collaboration, alignant les objectifs agricoles et de conservation. Le renforcement de la coopération intergouvernementale et l'harmonisation des outils de conservation entre les juridictions permettraient d'améliorer les résultats pour la biodiversité et les paysages agricoles.

En explorant les services écosystémiques de grande valeur à l'échelle du paysage, nous pouvons naviguer dans la dynamique spatiale et identifier les compromis dominants entre l'intégrité écologique et la performance économique. Comprendre où et comment les services écosystémiques sont importants pour l'agriculture nous permet d'identifier des modèles spatiaux qui reflètent à la fois l'importance écologique et les fonctions économiques de la spécialisation des activités agricoles. Les résultats de cette analyse peuvent éclairer les options politiques visant à améliorer la connectivité des services écosystémiques clés et à favoriser la multifonctionnalité. Ci-dessous, je souligne plusieurs voies politiques potentielles qui positionnent les agroécosystèmes des prairies comme des opportunités stratégiques pour le développement durable au Canada.

**Exploiter les agroécosystèmes en tant qu'atouts pour l'atténuation du changement climatique** : reconnaître les agroécosystèmes comme des opportunités stratégiques plutôt que comme des éléments de passif environnemental. En intégrant des pratiques de gestion durable, les décideurs politiques peuvent exploiter le double avantage des paysages agricoles, en les transformant en outils de régulation du climat régional et de conservation de la biodiversité.

**Promouvoir des pratiques agricoles intégrées et durables** : encourager des politiques ciblées qui soutiennent des pratiques adaptées au contenu, telles que l'agriculture sans travail et le travail de conservation du sol pour réduire la perturbation des sols et améliorer la rétention de l'humidité, les cultures de couverture pour améliorer la fertilité des sols et prévenir l'érosion, et la pérennisation (par exemple, en utilisant des plantes vivaces à racines profondes ou des tampons agroforestiers) pour séquestrer le carbone et stabiliser le paysage. Ces méthodes permettent non seulement de maintenir ou d'améliorer la productivité des cultures, mais aussi de renforcer les services écosystémiques, tels que l'augmentation de l'albédo de surface et la séquestration du carbone, soutenant ainsi à la fois la sécurité alimentaire et les objectifs d'atténuation de la perte de biodiversité et du climat.

**Inciter à la gestion multifonctionnelle des terres** : développer des instruments politiques ciblés tels que les systèmes de paiement agroenvironnementaux, les subventions basées sur les performances ou les contrats de gestion liés aux résultats qui récompensent les propriétaires terriens pour l'adoption de pratiques qui soutiennent de multiples services écosystémiques. Ces mécanismes devraient aller au-delà du paiement traditionnel des services écosystémiques (PSE) en compensant efficacement les compromis associés à la production agroalimentaire intensive, en veillant à ce que les producteurs reconnaissent le caractère essentiel de ces mesures. Par exemple, les politiques pourraient inclure le recadrage des chaînes d'approvisionnement nationales et locales pour favoriser les produits à valeur de conservation ou cibler les marchés qui donnent la priorité à la durabilité, même en l'absence d'incitations financières directes. Ces efforts doivent être complétés par des stratégies visant à sensibiliser les consommateurs et à les inciter à payer, car l'adoption par le marché dépend en fin de compte de la demande d'attributs de durabilité. En outre, les outils traditionnels - tels que les incitations financières, les allègements fiscaux ou les subventions - restent essentiels pour promouvoir des pratiques qui améliorent la santé des sols, la qualité de l'eau et la biodiversité tout en maintenant la productivité agricole, tant que le comportement des agriculteurs face au risque et leurs résultats financiers les encouragent à le faire. Pour garantir l'équité et la responsabilité fiscale, ces programmes doivent donner la priorité aux actions qui génèrent des avantages environnementaux mesurables et qui ne seraient pas mises en œuvre sans soutien public. Cela permet de catalyser une véritable transformation plutôt que de subventionner le statu quo.

**Améliorer les pratiques agroécologiques** : promouvoir l'intégration de l'agroforesterie, des zones tampons riveraines et des haies dans les paysages agricoles afin de réduire la fragmentation, d'améliorer la qualité de l'eau et de favoriser la connectivité des habitats. Ces mesures ascendantes peuvent contribuer à atténuer les incidences sur l'environnement tout en améliorant la diversité des services écosystémiques.

**Aligner les cadres politiques sur des objectifs multifonctionnels** : réviser les politiques agricoles et environnementales existantes afin de concilier la croissance économique et les priorités en matière de conservation. Les politiques devraient encourager une utilisation multifonctionnelle des terres qui permette à la fois d'obtenir des rendements élevés, de préserver les habitats naturels et d'améliorer la résilience globale des écosystèmes.

**Encourager la collaboration et l'innovation intersectorielles et leurs investissements** : développer des plateformes multipartites et des plateformes de détenteurs de droits qui rassemblent les agriculteurs, les chercheurs, les agences environnementales et les communautés locales pour mener des recherches qui seront facilement adoptées par les agriculteurs compte tenu de leurs préférences et de leurs situations uniques. Cela favorisera l'adoption de pratiques de gestion adaptatives qui concilient la productivité agricole et la durabilité environnementale, garantissant ainsi un cadre agroécosystémique résilient.

## Méthode

Les méthodes utilisées dans cette étude comprennent deux étapes principales. Tout d'abord, nous avons quantifié et cartographié les services écosystémiques clés dans la zone d'étude à l'aide de l'outil de modélisation InVEST (Sharp et al. 2014). Ensuite, nous avons développé et appliqué deux indices spatiaux - la multifonctionnalité cumulative et l' $\alpha$ -multifonctionnalité (Simion et al. 2023) - dérivés des cartes des services écosystémiques individuels. Ces indices ont été évalués dans le cadre de deux scénarios : (a) paysages naturels et (b) paysages gérés, y compris les terres cultivées. Les schémas spatiaux de la diversité des services écosystémiques ont été analysés, et l'indice  $\alpha$ -multifonctionnel a été comparé entre les principaux types

d'occupation des sols. L'indice cumulatif de multifonctionnalité aide à hiérarchiser les efforts de conservation à grande échelle, tandis que l'indice  $\alpha$ -multifonctionnalité permet d'envisager des interventions diversifiées et ciblées.

## Quantification des principaux services écosystémiques

La sélection des principaux services écosystémiques dans les prairies a été guidée par la disponibilité des données et éclairée par des discussions avec les parties prenantes locales, notamment Canards Illimités Canada, les chercheurs du projet Prairie Water et les collaborateurs de ResNet dans les prairies. Nous nous sommes concentrés sur la pollinisation, le stockage du carbone, l'érosion du sol et la rétention des sédiments, la purification de l'eau, la qualité de l'habitat et la productivité des cultures. Ces services ont tous été quantifiés dans l'espace à l'aide des modèles InVEST, à l'exception de la productivité des cultures, pour laquelle nous avons développé un indice de substitution combinant l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et la densité spatiale des types de cultures dans la zone d'étude.

**Pollinisation :** La suffisance de l'habitat des pollinisateurs a été évaluée à l'aide du modèle InVEST Crop Pollination. La moyenne de l'abondance totale des pollinisateurs au printemps et en été a été utilisée comme indicateur de la capacité d'approvisionnement en pollinisateurs du paysage. Trois guildes clés de pollinisateurs dans les prairies ont été prises en compte : les bourdons, les abeilles suitées et les abeilles mineuses, chacune ayant des schémas d'activité saisonnière et des distances de recherche de nourriture distincts. Ces guildes jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes en assurant la pollinisation des ressources florales, y compris les terres cultivées. Une analyse antérieure réalisée par Pashanejad et al. (2023) , qui a utilisé une approche similaire dans ARIES, a permis de paramétrer le modèle de pollinisation. Les coefficients du modèle ont été affinés sur la base d'analyses documentaires locales et d'avis d'experts.

**Stockage de carbone :** Nous avons utilisé le modèle InVEST de stockage et de séquestration du carbone pour identifier la distribution spatiale des zones où le stockage du carbone est le plus élevé dans la zone d'étude. Ce modèle est basé sur le cycle du carbone et tient compte de quatre réservoirs de carbone distincts : la biomasse aérienne, la biomasse souterraine, la matière organique morte et le carbone du sol. Il estime le stockage total de carbone au niveau du pixel en utilisant les données de la couverture terrestre. Pour cette étude, nous avons adopté les paramètres et les coefficients du modèle d'une analyse antérieure réalisée par Pashanejad et al. (2024) , à plus petite échelle dans le centre de l'Alberta. En nous appuyant sur ces paramètres validés, y compris les coefficients spécifiques à la couverture terrestre dérivés d'ensembles de données mondiales et nationales, nous avons appliqué le modèle à l'ensemble des prairies canadiennes. Plus précisément, les valeurs du bassin de carbone pour la biomasse aérienne et souterraine proviennent d'un ensemble de données mondiales (Spawn et Gibbs 2020) , tandis que les valeurs du carbone du sol et de la matière organique morte proviennent d'un ensemble de données nationales produit par le WWF-Canada (Sothe et al. 2022) .

**Contrôle de l'érosion des sols (rétention des sédiments) :** Comme pour la pollinisation et le stockage du carbone, nous avons utilisé le modèle InVEST Sediment Delivery Ratio (SDR), qui intègre un paramétrage antérieur spécifiquement adapté aux prairies (Pashanejad et al. 2024) . Le modèle SDR applique l'équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE), qui tient compte du climat, de la texture du sol, de la topographie et de l'occupation des sols, ainsi que d'un indice de connectivité qui tient compte des caractéristiques de montée et de descente de chaque pixel (Chaplin-Kramer et al. 2022) . Le modèle fournit deux indicateurs principaux des services de rétention des sédiments : L'érosion évitée et l'exportation évitée. L'érosion évitée évalue l'efficacité de la végétation à minimiser l'érosion du sol à un endroit donné, offrant ainsi des informations précieuses pour les efforts de conservation du sol, en particulier dans les régions agricoles où la préservation de la couche arable est essentielle pour la fertilité du sol et la production alimentaire (Guerra et al. 2022) . L'exportation évitée, quant à elle, mesure la réduction du flux de sédiments dans les masses d'eau grâce à la couverture végétale, ce qui favorise la régulation de la qualité de l'eau et la santé écologique (Project 2023) . Dans cette recherche, nous avons choisi l'érosion évitée, qui sert d'indicateur de la capacité du paysage à fournir des services de régulation de l'érosion des sols.

**Rétention des nutriments :** Pour quantifier la rétention des nutriments, nous avons utilisé le modèle NDR (Nutrient Delivery Ratio) d'InVEST, en nous concentrant sur l'azote et le phosphore. Le modèle NDR intègre des facteurs tels que l'application d'engrais, les précipitations, la topographie et la capacité de rétention de la

Équilibrer l'agriculture et la conservation des Prairies canadiennes: Un cadre systémique pour naviguer les dynamiques spatiales des paysages agricoles

végétation. Ce modèle a été appliqué à différentes échelles, y compris les contextes mondiaux (Chaplin-Kramer et al. 2019, 2022). Étant donné que le modèle ne quantifie pas directement la rétention des nutriments en tant que service écosystémique, nous avons calculé l'efficacité relative de la rétention de l'azote à l'échelle du paysage, telle que définie par l'équation suivante :

$$NRE(p) = \frac{L_n(p) - E_n(p)}{L_n(p)}$$

Où :  $L_n(p)$  : La charge modifiée de nutriments au pixel  $p$ , dérivée de la sortie modifiée, représentant la charge initiale estimée de nutriments en tenant compte du potentiel de ruissellement local.

$E_n(p)$ : L'exportation totale de nutriments à partir du pixel  $p$ , représentant la quantité de nutriments transportés vers les masses d'eau.

$NRE(p)$  représente l'efficacité des nutriments au niveau du pixel  $p$ , avec des valeurs comprises entre 0 et 1. Une valeur de 1 indique que tous les nutriments sont retenus à l'intérieur du pixel, ce qui montre une efficacité maximale dans la rétention des nutriments et une contribution minimale à la pollution par les nutriments en aval. Inversement, une valeur de zéro indique que tous les nutriments sont exportés du pixel, contribuant entièrement aux charges de nutriments en aval et à la dégradation potentielle de la qualité de l'eau.

Pour adapter les paramètres du modèle au contexte des prairies, nous avons procédé à une analyse documentaire complète des directives gouvernementales et des études locales sur l'épandage d'engrais pour différents types de cultures pratiquées dans les prairies. Pour les taux d'application d'azote spécifiques aux cultures, nous avons développé une approche basée sur les enseignements tirés d'études nationales antérieures sur les bilans d'azote (Karimi et al. 2020).

**Productivité des cultures :** Pour quantifier la productivité des cultures, nous avons mis au point un indice de substitution combinant l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et la densité spatiale des principaux types de cultures dans les prairies canadiennes. À l'aide de Google Earth Engine (GEE), nous avons dérivé le produit MODIS MOD13Q1, qui fournit des valeurs composites de NDVI sur 16 jours. La collection d'images a été filtrée pour la période allant du 1er juin au 1er septembre 2020, ce qui correspond à la saison de croissance maximale dans la région étudiée. Pour nous concentrer spécifiquement sur la productivité agricole, nous avons utilisé l'inventaire annuel des cultures d'AAC dans GEE pour masquer les zones non agricoles, en veillant à ce que seule la végétation des terres cultivées contribue au calcul du NDVI. Ensuite, la productivité des cultures a été calculée en intégrant les valeurs moyennes du NDVI aux données de densité spatiale pour les cultures annuelles. Les valeurs de densité spatiale sont des indicateurs numériques matriciels de la proportion de la superficie de chaque pixel susceptible d'être occupée par des cultures annuelles, calculée à partir d'une analyse de l'inventaire annuel des cultures d'AAC pour la période 2009-2021. Les pixels présentant des valeurs de densité spatiale plus élevées représentent des zones plus susceptibles d'être occupées par des cultures annuelles. Les méthodes de détermination des scores de productivité consistent à ajuster les valeurs NDVI afin d'exclure les valeurs négatives indiquant des zones non végétalisées et à multiplier les valeurs NDVI moyennes ajustées par la densité spatiale normalisée des cultures pour chaque pixel. La formule de calcul du score de productivité (PS) de chaque pixel est exprimée comme suit :

$$PS_i = NDVI_{adjusted,i} \times Spatial\ Density_i$$

Où:

$NDVI_{adjusted,i}$  est la valeur moyenne ajustée du NDVI pour le pixel  $i$ , ce qui garantit que toutes les valeurs utilisées dans les calculs de productivité sont positives.

$Spatial\ Density_i$  est la densité spatiale normalisée des cultures pour le pixel  $i$ . Le score de productivité des cultures (PS) est compris entre 0 et 1, les valeurs les plus élevées indiquant des zones présentant à la fois un état de santé élevé de la végétation, tel que reflété par le NDVI, et une forte probabilité de culture.

**Qualité de l'habitat :** Nous avons utilisé le modèle de qualité de l'habitat d'InVEST (Sharp et al. 2014), pour indiquer indirectement le potentiel du paysage à soutenir la biodiversité et, à son tour, à maintenir la fonction de

l'écosystème. Le modèle évalue la qualité de l'habitat sur la base des données relatives à l'occupation et à l'utilisation des sols, en intégrant des facteurs tels que l'adéquation des différentes couvertures terrestres à la biodiversité, l'impact de diverses menaces anthropiques et la sensibilité de chaque couverture terrestre ou type d'utilisation des sols à ces menaces (Terrado et al. 2016). Dans les prairies, les zones humides et les fondrières des prairies constituent des habitats essentiels pour une grande variété d'espèces, notamment les pollinisateurs, le bison des plaines, le renard véloce, la chevêche des terriers et diverses espèces d'oiseaux aquatiques qui soutiennent de multiples fonctions de l'écosystème. Nous avons développé un modèle généralisé de qualité de l'habitat plutôt que de nous concentrer sur des espèces spécifiques, ce qui nous permet d'avoir une vue d'ensemble de l'adéquation du paysage tout en tenant compte des menaces importantes qui pèsent sur ces habitats. Les paramètres du modèle s'inspirent d'études similaires menées dans les prairies, telles que Akbari et al. (2021) ; et Shaffer et al. (2019), ainsi que de rapports gouvernementaux. Par exemple, nous avons utilisé l'indice de capacité de l'habitat faunique pour les terres agricoles qui est développé et calculé à l'échelle des Pédopaysages du Canada (PPC) dans le cadre des Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement (Environnement et Changement climatique Canada 2024b). Les principales menaces prises en compte dans le modèle sont l'expansion agricole, la construction de routes et de voies ferrées, le développement urbain, les infrastructures énergétiques et les principales industries émettant beaucoup de CO<sub>2</sub>, telles qu'identifiées dans les indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement. Le tableau 1 ci-dessous fournit une liste complète des menaces prises en compte dans le modèle. Le modèle InVEST HQ applique une fonction de décroissance de la distance pour représenter la façon dont l'intensité de chaque menace diminue avec la distance. Le modèle prend également en compte la sensibilité de l'habitat, reconnaissant que les habitats naturels sont généralement plus vulnérables aux perturbations, tandis que les terres cultivées et autres paysages modifiés ont déjà subi des changements significatifs par rapport à leur état d'origine. Par exemple, les zones humides et les prairies naturelles, qui constituent un habitat essentiel pour la biodiversité, ont des scores de sensibilité plus élevés, ce qui signifie qu'elles sont plus susceptibles d'être dégradées par des perturbations à proximité.

Tableau 3. Menaces anthropiques prises en compte dans le modèle InVEST de qualité de l'habitat pour les prairies canadiennes.

Menace	Description
Expansion des cultures	L'intensification de l'agriculture remplace l'habitat naturel
Extension des pâturages	Conversion des prairies indigènes en pâturages aménagés
Développement urbain	Expansion des villes et des établissements ruraux
Routes principales	Les routes à forte circulation augmentent la fragmentation
Routes secondaires	Routes à faible trafic affectant la connectivité des habitats locaux
Chemins de fer	L'infrastructure ferroviaire a un impact sur le déplacement des espèces
Extraction d'huile (active)	Opérations d'extraction de pétrole et de gaz en cours
Extraction d'huile (Inactif)	Sites d'extraction abandonnés
Centrales électriques	Sites de production d'énergie contribuant à la pollution et à la perturbation de l'habitat
Émissions des principales sources industrielles	Émissions industrielles de CO <sub>2</sub> contribuant à la pollution de l'air

## Indices de multifonctionnalité des SE

Nous avons développé deux indices basés sur les SE afin d'explorer la multifonctionnalité de la fourniture de services à l'échelle du paysage. La première approche est le niveau agrégé de la fourniture de tous les SE à chaque endroit (par exemple, pixel ou unité) et est l'indice cumulatif de fourniture de SE qui tient compte de la fourniture totale de SE multiples. L'indice cumulatif a été calculé comme la somme des trames normalisées des SE, y compris la pollinisation, la qualité de l'habitat, le stockage du carbone, la rétention des nutriments, le contrôle de l'érosion du sol et la productivité des cultures.

$$M(x) = \sum_{i=1}^N ES_i(x)$$



Où :  $M(x)$  est l'indice de multifonctionnalité à l'emplacement  $x$ ,  $ES_i(x)$  est la valeur normalisée du service écosystémique à l'emplacement  $x$ .  $N$  est le nombre total de services écosystémiques considérés.

L' $\alpha$ -multifonctionnalité, quant à elle, rend compte de l'homogénéité et de la diversité des services de plusieurs SE provenant d'unités uniques de fourniture de SE telles que le pixel ou toute autre unité agrégée. Elle reflète le degré d'équilibre ou d'hétérogénéité de la contribution des différents SE à un pixel ou à une unité donnée(e). Nous avons suivi la méthode appliquée par Simion et al. (2023), en utilisant l'indice de diversité de Gini-Simpson pour les SE sélectionnés dans la zone d'étude. L'indice de diversité des SE s'exprime comme suit :

$$\alpha = 1 - \sum_{i=1}^N p_i^2$$

Où :  $\alpha$  est l' $\alpha$ -multifonctionnalité à un endroit donné,  $N$  est le nombre total d'EE  $P_i$  et  $P_i$  est l'offre de SE par rapport à l'offre totale de SE à l'endroit. Dans cet indice, les valeurs élevées indiquent une grande diversité, ce qui signifie que de nombreux SE contribuent de manière égale, et les valeurs faibles indiquent une faible diversité (c'est-à-dire qu'un ou quelques SE dominent par rapport à tous les autres SE considérés). Bien que certaines zones puissent exceller dans la fourniture d'un ou deux services clés, les paysages qui soutiennent un mélange plus homogène de services sont généralement plus résistants au stress et mieux adaptés au maintien d'objectifs multiples tels que la production alimentaire, la biodiversité et l'adaptation au climat.

## Remerciements

L'auteur remercie l'Institut canadien des politiques agro-alimentaires (ICPA) et les membres de son équipe pour leur soutien financier et pour avoir offert une opportunité de mentorat enrichissante avec Dr Thomas Nudds, membre distingué de l'ICPA. Nous remercions tout particulièrement Dr. Nudds pour ses idées stimulantes et ses commentaires constructifs qui ont contribué à façonner les arguments en faveur de la conservation et les recommandations politiques présentées dans ce rapport. L'auteur remercie également Margaret Zafiriou et Elisabeta Lika de l'ICPA pour leurs précieux commentaires et leurs conseils qui ont permis d'affiner les implications politiques. Lael Parrott, pour son soutien et ses commentaires au cours des premières étapes de l'analyse.



# Références

- Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2024. "Vue d'ensemble du secteur agricole et agroalimentaire canadien. *Gouvernement du Canada*. Consulté (<https://agriculture.canada.ca/en/sector/overview>).
- Akbari, Aidin, Jeremy Pittman et Rob Feick. 2021. "Mapping the Relative Habitat Quality Values for the Burrowing Owls (*Athene Cunicularia*) of the Canadian Prairies Using an Innovative Parameterization Approach in the InVEST HQ Module". *Environmental Management* 68(3):310-28. doi : 10.1007/s00267-021-01502-w.
- Bartzen, Blake A., Kevin W. Dufour, Robert G. Clark et F. Dale Caswell. 2010. "Tendances de l'impact de l'agriculture et du rétablissement des terres humides dans les Prairies canadiennes ". *Ecological Applications* 20(2):525-38. doi : 10.1890/08-1650.1.
- Baulch, Helen, Colin Whitfield, Jared Wolfe, Nandita Basu, Angela Bedard-Haughn, Kenneth Belcher, Robert Clark, Grant Ferguson, Masaki Hayashi, Andrew Ireson, Patrick Lloyd-Smith, Phil Loring, John W. Pomeroy, Kevin Shook et Christopher Spence. 2021. "Synthèse de la science : Findings on Canadian Prairie Wetland Drainage". *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques* 46(4):229-41. doi : 10.1080/07011784.2021.1973911.
- Chaplin-Kramer, Rebecca, Rachel A. Neugarten, Richard P. Sharp, Pamela M. Collins, Stephen Polasky, David Hole, Richard Schuster, Matthew Strimas-Mackey, Mark Mulligan, Carter Brandon, Sandra Diaz, Etienne Fluet-Chouinard, L. J. Gorenflo, Justin A. Johnson, Christina M. Kennedy, Patrick W. Keys, Kate Longley-Wood, Peter B. McIntyre, Monica Noon, Unai Pascual, Catherine Reidy Liermann, Patrick R. Roehrdanz, Guido Schmidt-Traub, M. Rebecca Shaw, Mark Spalding, Will R. Turner, Arnout van Soesbergen et Reg A. Watson. 2022. "Mapping the Planet's Critical Natural Assets" (Cartographie des ressources naturelles essentielles de la planète). *Nature Ecology & Evolution* 7(1):51-61. doi : 10.1038/s41559-022-01934-5.
- Chaplin-Kramer, Rebecca, Richard P. Sharp, Charlotte Weil, Elena M. Bennett, Unai Pascual, Katie K. Arkema, Kate A. Brauman, Benjamin P. Bryant, Anne D. Guerry, Nick M. Haddad, Maike Hamann, Perrine Hamel, Justin A. Johnson, Lisa Mandle, Henrique M. Pereira, Stephen Polasky, Mary Ruckelshaus, M. Rebecca Shaw, Jessica M. Silver, Adrian L. Vogl et Gretchen C. Daily. 2019. "Modélisation globale des contributions de la nature à l'homme". *Science* 366(6462):255-58. doi : 10.1126/science.aaw3372.
- Díaz, Sandra, Unai Pascual, Marie Stenseke, Berta Martín-López, Robert T. Watson, Zsolt Molnár, Rosemary Hill, Kai M. A. Chan, Ivar A. Baste, Kate A. Brauman, Stephen Polasky, Andrew Church, Mark Lonsdale, Anne Larigauderie, Paul W. Leadley, Alexander P. E. van Oudenhoven, Felice van der Plaats, Matthias Schröter, Sandra Lavorel, Yildiz Aumeeruddy-Thomas, Elena Bukvareva, Kirsten Davies, Sebsebe Demissew, Gunay Erpul, Pierre Failler, Carlos A. Guerra, Chad L. Hewitt, Hans Keune, Sarah Lindley, et Yoshihisa Shirayama. 2018. "Assessing Nature's Contributions to People (Évaluer les contributions de la nature à l'homme)". *Science* 359(6373):270-72. doi : 10.1126/science.aap8826.
- Diversité, Convention sur la diversité biologique. 2022. *Cadre mondial pour la biodiversité Kunming-Montréal*.
- Drever, C. Ronnie, Susan C. Cook-Patton, Fardausi Akhter, Pascal H. Badiou, Gail L. Chmura, Scott J. Davidson, Raymond L. Desjardins, Andrew Dyk, Joseph E. Fargione, Max Fellows, Ben Filewod, Margot Hensing-Lewis, Susantha Jayasundara, William S. Keeton, Timm Kroeger, Tyler J. Lark, Edward Le, Sara M. Leavitt, Marie-Eve LeClerc, Tony C. Lemprière, Juha Metsaranta, Brian McConkey, Eric Neilson, Guillaume Peterson St-Laurent, Danijela Puric-Mladenovic, Sebastien Rodrigue, Raju Y. Soolanayakanahally, Seth A. Spawn, Maria Strack, Carolyn Smyth, Naresh Thevathasan, Mihai Voicu, Christopher A. Williams, Peter B. Woodbury, Devon E. Worth, Zhen Xu, Samantha Yeo et Werner A. Kurz. 2021. "Solutions climatiques naturelles pour le Canada". *Science Advances* 7(23). doi : 10.1126/sciadv.abd6034.
- Environnement et changement climatique Canada. 2024a. *Stratégie pour la nature 2030 du Canada : Enrayer et inverser la perte de biodiversité au Canada*. Gatineau, Québec.
- Environnement et changement climatique Canada. 2024b. *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Capacité du paysage agricole à soutenir la faune*.
- Frei, Barbara, Cibele Queiroz, Becky Chaplin-Kramer, Erik Andersson, Delphine Renard, Jeanine M. Rhemtulla et Elena M. Bennett. 2020. "Un avenir plus radieux : Objectifs complémentaires de diversité et de multifonctionnalité pour

- construire des paysages agricoles résilients". *Global Food Security* 26:100407. doi : 10.1016/j.gfs.2020.100407.
- Gaba, Sabrina, et Vincent Bretagnolle. 2020. "Concevoir des paysages agricoles multifonctionnels et résilients : Lessons from Long-Term Monitoring of Biodiversity and Land Use". Pp. 203-24 dans *The Changing Status of Arable Habitats in Europe*. Cham : Springer International Publishing.
- Gouvernement du Canada. 2021. "Développement économique des Prairies Canada.
- Guerra, Carlos A., Miguel Berdugo, David J. Eldridge, Nico Eisenhauer, Brajesh K. Singh, Haiying Cui, Sebastian Abades, Fernando D. Alfaro, Adebola R. Bamigboye, Felipe Bastida, José L. Blanco-Pastor, Asunción de los Ríos, Jorge Durán, Tine Grebenc, Javier G. Illán, Yu-Rong Liu, Thulani P. Makhwanyane, Steven Mamet, Marco A. Molina-Montenegro, José L. Moreno, Arpan Mukherjee, Tina U. Nahberger, Gabriel F. Peñaloza-Bojacá, César Plaza, Sergio Picó, Jay Prakash Verma, Ana Rey, Alexandra Rodríguez, Leho Tedersoo, Alberto L. Teixido, Cristian Torres-Díaz, Pankaj Trivedi, Juntao Wang, Ling Wang, Jianyong Wang, Eli Zaady, Xiaobing Zhou, Xin-Quan Zhou et Manuel Delgado-Baquerizo. 2022. "Global Hotspots for Soil Nature Conservation" (Points chauds mondiaux pour la conservation de la nature des sols). *Nature* 610(7933):693-98. doi : 10.1038/s41586-022-05292-x.
- Karimi, Rezvan, Sarah J. Pogue, Roland Kröbel, Karen A. Beauchemin, Timothy Schwinghamer et H. Henry Janzen. 2020. "An Updated Nitrogen Budget for Canadian Agroecosystems" (Un bilan actualisé de l'azote pour les agroécosystèmes canadiens). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 304:107046. doi : 10.1016/j.agee.2020.107046.
- Liu, J., D. E. Worth, R. L. Desjardins, D. Haak, B. McConkey et D. Cerkowniak. 2021. "Influence de deux pratiques de gestion dans les Prairies canadiennes sur le forçage radiatif". *Science of The Total Environment* 765:142701. doi : 10.1016/j.scitotenv.2020.142701.
- Liu, Jianguo, Raymond L. Desjardins, Shusen Wang, Devon E. Worth, Budong Qian et Jiali Shang. 2022. "Impact climatique des pratiques de gestion agricole dans les Prairies canadiennes : Carbon Equivalence Due to Albedo Change". *Journal of Environmental Management* 302:113938. doi : 10.1016/j.jenvman.2021.113938.
- McDaniel, Marshall D., Jeffrey A. Bird, Jennifer Pett-Ridge, Erika Marin-Spiotta, Tom M. Schmidt et A. Stuart Grandy. 2023. "La diversification et la pérennisation des plantes dans les agroécosystèmes modifient la rétention de nouveaux  $C$  et  $N$  à partir des résidus de culture". *Ecological Applications* 33(2). doi : 10.1002/eap.2784.
- Molnar, Michelle, Paige. Olmstead, Matthew. Mitchell, Ciara. Raudsepp-Hearne, et Mark Anielski. 2021. *Services écosystémiques ; chapitre 5 dans Le Canada face aux changements climatiques : Rapport sur les enjeux nationaux*. Ottawa, Ontario.
- Nebel, Silke, et Ian Cook. 2024. *Endiguer la perte de prairies au Canada : Une analyse des solutions politiques*.
- Neugarten, Rachel A., Rebecca Chaplin-Kramer, Richard P. Sharp, Richard Schuster, Matthew Strimas-Mackey, Patrick R. Roehrdanz, Mark Mulligan, Arnout van Soesbergen, David Hole, Christina M. Kennedy, James R. Oakleaf, Justin A. Johnson, Joseph Kiesecker, Stephen Polasky, Jeffrey O. Hanson et Amanda D. Rodewald. 2024. "Mapping the Planet's Critical Areas for Biodiversity and Nature's Contributions to People" (Cartographie des zones critiques de la planète pour la biodiversité et les contributions de la nature à l'homme). *Nature Communications* 15(1):261. doi : 10.1038/s41467-023-43832-9.
- Nyström, M., J. B. Jouffray, A. V. Norström, B. Crona, P. Sjøgaard Jørgensen, S. R. Carpenter, Ö. Bodin, V. Galaz, et C. Folke. 2019. "Anatomie et résilience de l'écosystème de production mondial". *Nature* 575(7781):98-108. doi : 10.1038/s41586-019-1712-3.
- Olewiler, Nancy D. 2004. *La valeur du capital naturel dans les régions colonisées du Canada*. Canards Illimités Canada.
- Olimb, Sarah K., et Barry Robinson. 2019. "Grass to Grain : Modélisation probabiliste de la conversion agricole dans les grandes plaines nord-américaines." *Ecological Indicators* 102:237-45. doi : 10.1016/j.ecolind.2019.02.042.
- Pashanejad, Ehsan, Ali Kharrazi, Zuelclady M. F. Araujo-Gutierrez, Brian E. Robinson, Brian D. Fath et Lael Parrott. 2024. "A Functional Connectivity Approach for Exploring Interactions of Multiple Ecosystem Services in the Context of Agricultural Landscapes in the Canadian Prairies (Approche de la connectivité fonctionnelle pour explorer les interactions de multiples services écosystémiques dans le contexte des paysages agricoles des Prairies canadiennes). *Ecosystem Services* 68:101639. doi : 10.1016/j.ecoser.2024.101639.

- Pashanejad, Ehsan, Hugo Thierry, Brian E. Robinson et Lael Parrott. 2023. "The Application of Semantic Modelling to Map Pollination Service Provisioning at Large Landscape Scales (L'application de la modélisation sémantique pour cartographier la fourniture de services de pollinisation à grande échelle). *Ecological Modelling* 484:110452. doi : 10.1016/j.ecolmodel.2023.110452.
- Paterson, James E., Lauren E. Bortolotti, Paige D. Kowal, Ashley J. Pidwerbesky et James H. Devries. 2024. "Predicting the Effects of Land Cover Change on Biodiversity in Prairie Canada Using Species Distribution Models ". *Biological Conservation* 298:110754. doi : 10.1016/j.biocon.2024.110754.
- Peterson, Caitlin A., Valerie T. Eviner, et Amélie C. M. Gaudin. 2018. " Voies d'avenir pour la recherche sur la résilience dans les agroécosystèmes ". *Agricultural Systems* 162:19-27. doi : 10.1016/j.agsy.2018.01.011.
- Projet, Capital naturel. 2023. "InVEST 3.13.0.
- Richter, Franziska J., Matthias Suter, Andreas Lüscher, Nina Buchmann, Nadja El Benni, Rafaela Feola Conz, Martin Hartmann, Pierrick Jan et Valentin H. Klaus. 2024. "Effects of Management Practices on the Ecosystem-Service Multifunctionality of Temperate Grasslands (Effets des pratiques de gestion sur la multifonctionnalité des services écosystémiques des prairies tempérées). *Nature Communications* 15(1):3829. doi : 10.1038/s41467-024-48049-y.
- Scott, Emma I., Eric Toensmeier, Fred Iutzi, Nathan A. Rosenberg, Sarah Taylor Lovell, Nicholas R. Jordan, Tessa E. Peters, Esther Akwii et Emily M. Broad Leib. 2022. "Policy Pathways for Perennial Agriculture". *Frontiers in Sustainable Food Systems* 6. doi : 10.3389/fsufs.2022.983398.
- Shaffer, Jill A., Cali L. Roth, et David M. Mushet. 2019. "Modélisation des effets de la production agricole, du développement énergétique et de la perte de prairies de conservation sur l'habitat aviaire" édité par I. A. Kimirei. *PLOS ONE* 14(1):e0198382. doi : 10.1371/journal.pone.0198382.
- Shang, Yiwei, Jørgen Eivind Olesen, Poul Erik Lærke, Kiril Manevski et Ji Chen. 2024. "Perennial Cropping Systems Increased Topsoil Carbon and Nitrogen Stocks over Annual Systems-a Nine-Year Field Study (Les systèmes de culture pérennes ont augmenté les stocks de carbone et d'azote de la couche arable par rapport aux systèmes annuels - une étude de terrain de neuf ans). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 365:108925. doi : 10.1016/j.agee.2024.108925.
- Sharp, Richard, H. T. Tallis, Taylor Ricketts, A. D. Guerry, Spencer A. Wood, Rebecca Chaplin-Kramer, E. Nelson, Driss Ennaanay, Stacie Wolny, et Nasser Olwero. 2014. "InVEST User's Guide. *The Natural Capital Project, Stanford*.
- Simion, Heidi, Valentina Giombini, Erich Tasser, Thomas Marsoner et Lukas Egarter Vigl. 2023. "Améliorer la compréhension de la multifonctionnalité des écosystèmes dans les régions montagneuses". *Ecological Solutions and Evidence* 4(3). doi : 10.1002/2688-8319.12265.
- Sothe, Camile, Alemu Gonsamo, Joyce Arabian, Werner A. Kurz, Sarah A. Finkelstein et James Snider. 2022. "Large Soil Carbon Storage in Terrestrial Ecosystems of Canada (Stockage important de carbone dans les sols dans les écosystèmes terrestres du Canada). *Global Biogeochemical Cycles* 36(2). doi : 10.1029/2021GB007213.
- Spawn, S. A., et H. K. Gibbs. 2020. "Cartes de densité de carbone de la biomasse aérienne et souterraine mondiale pour l'année 2010. *Ornl Daac*.
- Terrado, Marta, Sergi Sabater, Becky Chaplin-Kramer, Lisa Mandle, Guy Ziv et Vicenç Acuña. 2016. "Model Development for the Assessment of Terrestrial and Aquatic Habitat Quality in Conservation Planning" (Développement d'un modèle pour l'évaluation de la qualité des habitats terrestres et aquatiques dans la planification de la conservation). *Science of The Total Environment* 540:63-70. doi : https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.064.
- Whitfield, Colin J., Emily Cavaliere, Helen M. Baulch, Robert G. Clark, Christopher Spence, Kevin R. Shook, Zhihua He, John W. Pomeroy et Jared D. Wolfe. 2024. "An Integrated Assessment of Impacts to Ecosystem Services Associated with Prairie Pothole Wetland Drainage Quantifying Wide-Ranging Losses" édité par B. D. Hall. *FACETS* 9:1-15. doi : 10.1139/facets-2023-0207.

