

## **Surveillance à distance des écosystèmes : sélection de tendances mesurées à partir d'observations par satellite du Canada**

**F. Ahern<sup>1</sup>, J. Frisk<sup>2</sup>, R. Latifovic<sup>3</sup> et D. Pouliot<sup>4</sup>**

**Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010**

**Rapport technique thématique n° 17**

**Publié par les Conseils canadiens des ministres des ressources**

<sup>1</sup>TerreVista Earth Imaging, Cormac, Ontario

<sup>2</sup>Environnement Canada

<sup>3</sup>Centre canadien de télédétection

<sup>4</sup>Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada

Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

Surveillance à distance des écosystèmes : sélection de tendances mesurées à partir d'observations par satellite du Canada.

Publ. aussi en anglais sous le titre :

Monitoring ecosystems remotely: a selection of trends measured from satellite observations of Canada.

Monographie électronique en version PDF.

ISBN 978-0-660-21040-7

N° de cat. : En14-43/17-2013F-PDF

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques, mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par le gouvernement du Canada et que la reproduction n'a pas été faite en association avec le gouvernement du Canada ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de l'auteur. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec l'informathèque d'Environnement Canada au 1-800-668-6767 (au Canada seulement) ou 819-997-2800 ou par courriel à [enviroinfo@ec.gc.ca](mailto:enviroinfo@ec.gc.ca).

Ce rapport devrait être cité comme suit :

Ahern, F., Frisk, J., Latifovic, R. and Pouliot, D. 2011. Surveillance à distance des écosystèmes : sélection de tendances mesurées à partir d'observations par satellite du Canada. Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010, Rapport technique thématique n° 17.

Conseils canadiens des ministres des ressources. Ottawa, (Ont.). vi + 70 p.

<http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=137E1147-1>

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2013

Also available in English

# PRÉFACE

Les Conseils canadiens des ministres des ressources ont élaboré un Cadre axé sur les résultats en matière de biodiversité<sup>1</sup> en 2006 pour mettre l'accent sur les mesures de conservation et de restauration conformément à la *Stratégie canadienne de la biodiversité*<sup>2</sup>. Le rapport *Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010*<sup>3</sup> a été le premier rapport rédigé suivant ce cadre. Il permet d'évaluer les progrès réalisés en vue d'atteindre l'objectif du cadre, à savoir des « écosystèmes sains et diversifiés » et obtenir les deux résultats souhaités en matière de conservation : i) des écosystèmes productifs, résilients et diversifiés capables de se rétablir et de s'adapter et ii) la restauration des écosystèmes endommagés.

Les 22 constatations clés récurrentes présentées dans *Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010* sont issues de la synthèse et de l'analyse des rapports techniques préparés dans le cadre du présent projet. Plus de 500 experts ont participé à la rédaction et à l'examen de ces documents de base. Le présent document, *Surveillance à distance des écosystèmes : sélection de tendances mesurées à partir d'observations par satellite du Canada*, s'inscrit au nombre de plusieurs rapports préparés sur la situation et les tendances de thèmes nationaux intersectoriels. Il a été préparé et révisé par des experts du domaine d'étude et reflète les points de vue des auteurs.

## Remerciements

Ce projet n'aurait pas pu être réalisé sans l'enthousiasme et l'appui constant des collègues du premier auteur, qui proviennent de partout au Canada. Le Centre canadien de télédétection a fourni la majeure partie des données utilisées. L'auteur remercie Jean-Marc Chouinard, qui a offert dès le départ son soutien sur le plan de la gestion, ainsi que les scientifiques Rasim Latifovic, Robert Fraser, Richard Fernandes, Bert Guindon, Ian Olthof, Darren Pouliot et Hongxu Zhao, pour leurs précieux commentaires. Sans exception, ils ont aimablement fourni à l'auteur les données issues de leurs projets et ont répondu à toutes ses questions. En outre, Gunar Fedosejevs et Arvon Erickson l'ont aidé à obtenir les données MSS d'archives associées aux premiers satellites Landsat, qui lui ont permis d'étendre le cadre temporel de l'étude aux années 1970. L'aide des scientifiques du Service canadien des forêts a été tout aussi précieuse. Mike Wulder et Nicholas Coops (de l'Université de la Colombie-Britannique) ont fourni des produits nationaux issus de leur projet BioSpace ainsi que de l'aide concernant leur utilisation. Nous remercions également les réviseurs du rapport.

---

<sup>1</sup> Environnement Canada. 2006. Un cadre axé sur les résultats en matière de biodiversité pour le Canada. Conseils canadiens des ministres des ressources. Ottawa, ON. 8 p.

<http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=F14D37B9-1>

<sup>2</sup> Groupe de travail fédéral-provincial-territorial sur la biodiversité. 1995. Stratégie canadienne de la biodiversité : réponse du Canada à la Convention sur la diversité écologique. Environnement Canada, Bureau de la Convention sur la biodiversité. Ottawa, ON. 80 p. <http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=560ED58E-1>

<sup>3</sup> Les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada. 2010. Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010. Conseils canadiens des ministres des ressources. Ottawa, ON. vi + 148 p. <http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=83A35E06-1>

## Système de classification écologique – écozones<sup>+</sup>

Une version légèrement modifiée des écozones terrestres du Canada, décrite dans le *Cadre écologique national pour le Canada*<sup>4</sup>, a permis de déterminer les zones représentatives d'écosystèmes pour tous les rapports compris dans le présent projet. Les modifications comprennent : un ajustement des limites terrestres pour tenir compte des améliorations résultant des activités de vérification au sol; la fusion des trois écozones de l'Arctique en une seule écozone; l'utilisation de deux écoprovinces, à savoir le bassin intérieur de l'Ouest et la forêt boréale de Terre-Neuve; l'ajout de neuf zones marines représentatives d'écosystèmes; et l'ajout de l'écozone des Grands Lacs. Ce système de classification modifié est appelé « écozones<sup>+</sup> » dans ces rapports afin d'éviter toute confusion avec les « écozones » mieux connues du cadre initial<sup>5</sup>.



<sup>4</sup> Groupe de travail sur la stratification écologique. 1995. *Cadre écologique national pour le Canada*. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction générale de la recherche, Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques et Environnement Canada, Direction générale de l'état de l'environnement, Direction de l'analyse des écozones. Ottawa/Hull, ON. 144 p. Rapport et carte nationale 1/7 500 000.

<sup>5</sup> Rankin, R., Austin, M. et Rice, J. 2011. *Système de classification écologique pour le Rapport sur l'état et les tendances des écosystèmes*. Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010, Rapport technique thématique n° 1. Conseils canadiens des ministres des ressources. Ottawa, ON.

<http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=137E1147-1>

# Table des matières

PRÉFACE .....	I
Remerciements .....	i
Système de classification écologique – écozones <sup>+</sup> .....	ii
LISTE DES FIGURES .....	IV
LISTE DES TABLEAUX .....	VI
RÉSUMÉ .....	1
INTRODUCTION .....	2
CHANGEMENTS DANS LA COUVERTURE TERRESTRE .....	3
Changements dans les grandes classes de couverture terrestre (1985-2005) .....	3
Méthodes .....	3
Vérifications de la qualité et limites .....	4
Résultats .....	5
Analyse .....	10
Études de cas sur l'urbanisation .....	10
Méthodes .....	12
Résultats .....	13
Analyse .....	17
INDICE DE VÉGÉTATION PAR DIFFÉRENCE NORMALISÉE (1985-2006) .....	17
Méthodes .....	18
Vérifications de la qualité et limites .....	20
Résultats .....	20
Écozone <sup>+</sup> de l'Arctique .....	23
Écozone <sup>+</sup> de la taïga des plaines .....	23
Écozone <sup>+</sup> de la taïga du Bouclier .....	24
Écozone <sup>+</sup> du Bouclier boréal .....	24
Écozone <sup>+</sup> maritime de l'Atlantique .....	25
Écozone <sup>+</sup> des plaines à forêts mixtes .....	25
Écozone <sup>+</sup> des plaines boréales .....	26
Écozone <sup>+</sup> des Prairies .....	26
Écozone <sup>+</sup> de la taïga de la Cordillère .....	26
Écozone <sup>+</sup> de la Cordillère boréale .....	26
Écozone <sup>+</sup> maritime du Pacifique .....	27
Écozone <sup>+</sup> de la Cordillère montagnarde .....	27
Écozone <sup>+</sup> des plaines hudsoniennes .....	27
Écozone <sup>+</sup> du bassin intérieur de l'Ouest .....	27
Écozone <sup>+</sup> de la forêt boréale de Terre-Neuve .....	28
Analyse .....	28
INDICE DES HABITATS DYNAMIQUES (IHD) MOYEN DE 2000 À 2006 .....	29
Méthodes .....	29
Vérifications de la qualité et limites .....	30
Résultats .....	30
Analyse .....	36

INDICATEURS DE FRAGMENTATION – DENSITÉ FORESTIÈRE ET DENSITÉ DE LISIÈRES FORESTIÈRES .....	37
Méthodes .....	38
Vérifications de la qualité et limites.....	39
Résultats.....	39
Écozone <sup>+</sup> de la taïga des plaines.....	42
Écozone <sup>+</sup> de la taïga du Bouclier .....	42
Écozone <sup>+</sup> du Bouclier boréal .....	43
Écozone <sup>+</sup> maritime de l’Atlantique.....	43
Écozone <sup>+</sup> des plaines boréales .....	43
Écozone <sup>+</sup> de la taïga de la Cordillère .....	44
Écozone <sup>+</sup> de la Cordillère boréale .....	44
Écozone <sup>+</sup> maritime du Pacifique .....	44
Écozones <sup>+</sup> de la Cordillère montagnarde et du bassin intérieur de l’Ouest .....	45
Écozone <sup>+</sup> des plaines hudsoniennes.....	45
Écozone <sup>+</sup> de la forêt boréale de Terre-Neuve .....	45
Analyse .....	46
CONCLUSION.....	46
RÉFÉRENCES.....	48
ANNEXE I.....	54

## Liste des figures

Figure 1. Grandes classes de couverture terrestre au Canada, 2005 (résolution de 1 km). .....	6
Figure 2. Superficie par classe de couverture terrestre pour l’ensemble du Canada, de 1985 à 2005.....	7
Figure 3. Conversion des zones de forêt en d’autres classes, de 1985 à 2005. ....	8
Figure 5. Changements de la couverture terrestre dans la région du Golden Horseshoe de l’Ontario, 1974, 1990 et 2005. ....	13
Figure 6. Changements de la couverture terrestre dans la région du Golden Horseshoe de l’Ontario en 1974, 1990 et 2005. ....	14
Figure 7. Changements dans la couverture terrestre de la vallée du bas Fraser, en Colombie-Britannique, 1975, 1990 et 2007. ....	15
Figure 9. Régions étudiées dans le but d’analyser l’incidence du forçage climatique et de la nature de la couverture terrestre sur les tendances affichées par l’IVDN. ....	19
Figure 10. Tendances significatives ( $p < 0,05$ ) affichées par l’IVDN entre 1985 et 2006. ....	21
Figure 11. Dynamique de la végétation dans les écozones <sup>+</sup> du Canada par composante de l’indice des habitats dynamiques (moyenne de 2000 à 2005). ....	34
Figure 12. Densité des forêts dans la région forestière du Canada, vers 2000. ....	40
Figure 13. Densité de lisières forestières dans la région forestière du Canada, vers 2000.....	41
Figure 14. Couverture terrestre dans l’écozone <sup>+</sup> de l’Arctique en 2005. ....	56
Figure 15. Superficie par classe de couverture terrestre dans l’écozone <sup>+</sup> de l’Arctique, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	56

Figure 16. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> de la taïga des plaines en 2005. ....	57
Figure 17. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> de la taïga des plaines, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	57
Figure 18. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> de la taïga du Bouclier en 2005. ....	58
Figure 19. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> de la taïga du Bouclier, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	58
Figure 20. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> du Bouclier boréal en 2005. ....	59
Figure 21. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> du Bouclier boréal, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	59
Figure 22. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> maritime de l'Atlantique en 2005. ....	60
Figure 23. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> maritime de l'Atlantique, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	60
Figure 24. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> des plaines à forêts mixtes en 2005. ....	61
Figure 25. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> des plaines à forêts mixtes, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	61
Figure 26. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> des plaines boréales en 2005. ....	62
Figure 27. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> des plaines boréales, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	62
Figure 28. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> des Prairies en 2005. ....	63
Figure 29. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> des Prairies, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	63
Figure 30. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> de la taïga de la Cordillère en 2005. ....	64
Figure 31. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> de la taïga de la Cordillère, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	64
Figure 32. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> de la Cordillère boréale en 2005. ....	65
Figure 33. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> de la Cordillère boréale, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	65
Figure 34. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> maritime du Pacifique en 2005. ....	66
Figure 35. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> maritime du Pacifique, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	66
Figure 36. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> de la Cordillère montagnarde en 2005. ....	67
Figure 37. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> de la Cordillère montagnarde, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	67
Figure 38. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> des plaines hudsoniennes en 2005. ....	68
Figure 39. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> des plaines hudsoniennes, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	68
Figure 40. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> du bassin intérieur de l'Ouest en 2005. ....	69
Figure 41. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> du bassin intérieur de l'Ouest, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	69
Figure 42. Couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> de la forêt boréale de Terre-Neuve en 2005. ....	70
Figure 43. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone <sup>+</sup> de la forêt boréale de Terre-Neuve, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. ....	70

## Liste des tableaux

Tableau 1. Superficies des zones où les tendances affichées par l'IVDN sont à la hausse et en baisse, par écozone <sup>+</sup> , entre 1985 et 2006.....	22
Tableau 2. Caractéristiques de la dynamique de la végétation, par écozone <sup>+</sup> (moyenne de 2000 à 2005) .....	35



## RÉSUMÉ

Le présent rapport technique thématique résume les résultats de quatre grandes analyses de télédétection visant les écozones<sup>+</sup> du Canada : 1) les changements dans la couverture terrestre, de 1985 à 2005; 2) l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN), de 1985 à 2006; 3) l'indice des habitats dynamiques moyen, de 2000 à 2006; 4) les indicateurs de fragmentation forestière, vers 2000. La période d'analyse dépend de l'information utilisée pour évaluer chaque thème. Les principaux résultats sont les suivants :

- Il y a eu une augmentation nette d'environ 146 000 km<sup>2</sup> de la superficie des zones brûlées au Canada entre 1985 et 2005, soit une augmentation de 200 % par rapport à la superficie des zones brûlées en 1985. On a cependant observé une réduction de la superficie des zones brûlées au cours des cinq dernières années de l'analyse (de 2000 à 2005).
- Dans la classe des terres agricoles de l'écozone<sup>+</sup> des plaines boréales, une superficie nette d'environ 5 020 km<sup>2</sup> de terres cultivées/zones boisées (7,5 % de la superficie des terres cultivées/zones boisées de 1985) est passée dans la classe des terres cultivées, plus intensive, de 1985 à 2005.
- La superficie des zones urbaines dans la région du Golden Horseshoe de l'Ontario est passée de 1 111 km<sup>2</sup> en 1974 à 1 436 km<sup>2</sup> en 1990, ce qui représente une augmentation moyenne de 20 km<sup>2</sup>/année. Le taux d'expansion moyen a grimpé à 23 km<sup>2</sup>/année entre 1990 et 2005, et la superficie des zones urbaines a atteint 1 778 km<sup>2</sup>. Le taux d'expansion urbaine dans la vallée du bas Fraser, en Colombie-Britannique, a été de 6 km<sup>2</sup>/année en moyenne, la superficie des zones urbaines passant de 498 km<sup>2</sup> en 1975 à 680 km<sup>2</sup> en 2007.
- L'IVDN maximal annuel, un indicateur de la quantité et de la vigueur de la végétation verte, a considérablement augmenté dans 22 % du Canada entre 1985 et 2006. L'augmentation de l'IVDN était bien visible dans le nord, où les processus sont fortement induits par le climat, tandis que les tendances dans le sud étaient moins omniprésentes et surtout induites par les changements du couvert terrestre.
- La variation saisonnière de la verdure, l'une des trois composantes de l'indice des habitats dynamiques, a été très sensible aux changements de l'altitude et pourrait être utilisée comme un indicateur sensible des changements des zones de végétation. Cependant, la série chronologique actuelle est trop courte pour analyser les tendances.
- La densité forestière est particulièrement élevée dans la région boréale du Canada.

# INTRODUCTION

La télédétection est la science, la technologie et l'art d'obtenir de l'information au sujet d'objets ou de phénomènes à partir d'une certaine distance (Centre canadien de télédétection, 2005). Le présent rapport est centré sur les données de télédétection obtenues au moyen de capteurs satellites mesurant le rayonnement réfléchi ou émis à la surface de la Terre. Les données de télédétection, lorsqu'elles sont vérifiées et accompagnées de données recueillies sur le terrain, peuvent fournir des mesures cohérentes et reproductibles des écosystèmes, ce qui permet l'analyse des changements avec le temps. Les données satellitaires sont plus économiques en temps et en argent que les observations directes sur le terrain, et elles sont disponibles pour des régions qui, autrement, seraient inaccessibles. Ces données sont aussi utiles pour intégrer les résultats de mesures directes sur le terrain à un contexte élargi.

À l'achèvement du Rapport sur l'état et les tendances des écosystèmes (RETE), un examen des activités de télédétection et des ensembles de données disponibles pour l'évaluation de l'état et des tendances des écosystèmes au Canada a été réalisé. Cet examen a tenu compte, dans l'évaluation des mesures et des ensembles de données, de la résolution spatiale et temporelle, de la période couverte par les données d'archives et de la rapidité d'obtention des données. Les données à résolution élevée (moins de 10 m) fournissent de l'information à une échelle précise, mais leur volume élevé augmente le temps d'analyse. De plus, ces données ne sont pas disponibles pour les analyses à long terme. Les données à résolution moyenne (de 10 à 100 m), comme l'imagerie Landsat, fournissent de l'information assez détaillée, mais leur analyse nécessite aussi beaucoup de temps. Les données d'imagerie Landsat sont recueillies tous les 16 jours pour une même zone (ce qui limite la spécificité saisonnière<sup>6</sup>), et les données d'archives remontent aux années 1970. Les données à résolution élevée et moyenne servent donc surtout à la surveillance de zones précises dont on connaît déjà le caractère préoccupant, mais elles ne permettent pas de repérer toutes les zones de changement imprévu. Les données à basse résolution (plus de 100 m) fournissent quant à elles de l'information à grande échelle, de manière cohérente, dans l'ensemble du Canada. Les données d'archives remontent aux années 1980, et l'échantillonnage est effectué quotidiennement (ce qui permet de tenir compte de la spécificité saisonnière dans les mesures). Les données à basse résolution ne permettent de détecter que les changements à grande échelle; c'est pourquoi leur utilisation constitue une approche de surveillance plus réactive que proactive.

D'après les résultats de l'examen, l'information suivante a été recueillie et analysée par écozone<sup>\*</sup>, aux fins du RETE : le changement à grande échelle de la couverture terrestre dans l'ensemble du Canada de 1985 à 2005; des études de cas sur l'urbanisation dans

---

<sup>6</sup> La plupart des analyses nécessitent des images Landsat sans nuages. Par conséquent, comme chaque zone est échantillonnée aux 16 jours, il est possible qu'aucune image sans nuages ne soit disponible pour une zone au cours d'une période donnée.

deux des zones urbaines affichant la plus grande croissance au Canada; les tendances de la productivité de la végétation (IVDN) dans l'ensemble du Canada de 1986 à 2006; l'état d'un indice des habitats dynamiques récemment élaboré pour le Canada (dérivé de la fPAR, une autre mesure de la productivité de la végétation); l'état de deux indicateurs de la fragmentation forestière (densité des forêts et densité des lisières forestières). Le présent document présente les résultats de ces analyses, par écozone<sup>+</sup>. Cette information devait être incorporée aux rapports individuels sur les écozone<sup>+</sup>, avec d'autres données. Le présent rapport ne fournit pas d'examen de toutes les données de télédétection au Canada. Il est centré sur l'information disponible dans l'ensemble du Canada; c'est pourquoi d'autres données de télédétection pertinentes pour une écozone<sup>+</sup> en particulier pourraient aussi être incluses dans ces rapports.

## **CHANGEMENTS DANS LA COUVERTURE TERRESTRE**

### **Changements dans les grandes classes de couverture terrestre (1985-2005)**

Le Centre canadien de télédétection (CCT) a produit une série chronologique uniforme sur la couverture terrestre (1985, 1990, 1995, 2000, 2005) au Canada, à partir de données satellitaires de faible résolution (kilomètre), recueillies par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) au moyen de capteurs de radiomètres perfectionnés à haute résolution (AVHRR) (Latifovic et Pouliot, 2005). Cette série chronologique est la plus longue à cibler l'ensemble du Canada; c'est pourquoi elle est la seule à permettre la surveillance constante des tendances à long terme.

#### ***Méthodes***

Les données satellitaires sont affectées à des catégories de couverture terrestre au cours d'un processus nommé « classification des images » (Cihlar *et al.*, 1998). Les types de couvertures sont différenciés d'après les signatures spectrales (profils d'absorption et de réflectance du spectre électromagnétique) qui résultent du contenu pigmentaire, de la structure des feuilles et de la structure des plantes (Fleishman et Mac Nally, 2007).

Le CCT a mis au point une méthode robuste pour produire des cartes de la couverture terrestre, pour les années s'échelonnant de 1985 à 2005, à partir des changements détectés depuis la publication d'une carte de base préexistante (1995) et largement acceptée, produite par Cihlar *et al.* (1999). Les zones où des changements ont été détectés par rapport à la carte de base de 1995 ont été reclassées pour chaque année de la série chronologique, ce qui revenait à mettre à jour la carte de 1995 plutôt qu'à en créer de nouvelles. Cette méthode permet de maintenir un haut degré d'uniformité des images sur la couverture terrestre entre les cartes. La méthode utilisée pour la détection et la reclassification des changements est décrite en détail dans Latifovic et Pouliot (2005).

La carte à douze classes produite par le CCT a été simplifiée et ramenée à neuf classes aux fins du Rapport sur l'état et les tendances des écosystèmes (RETE) (annexe I). La classe des « zones perturbées », selon la légende des douze classes du CCT, a été modifiée pour devenir la classe des « zones brûlées »<sup>7</sup>, les trois classes concernant les « forêts » ont été combinées en une seule classe, et les classes des « terres cultivées » et des « terres cultivées/zones boisées » ont été combinées et renommées « terres agricoles » (annexe I). Les changements dans la couverture terrestre ont été examinés pour six de ces classes<sup>8</sup>. La couverture terrestre et ses modifications sont résumées par écozone<sup>+</sup> aux fins du RETE.

### ***Vérifications de la qualité et limites***

Les erreurs présentes dans les données peuvent être introduites à de nombreuses étapes. Les erreurs apparaissant dans la carte de base de 1995 peuvent être transférées aux cartes illustrant les changements observés qui ont été dérivées de cette carte de base. Il peut aussi y avoir des erreurs dans les données d'entrée satellitaires (AVHRR), dans le processus de détection des changements, ou encore dans la reclassification des changements détectés.

Une comparaison visuelle des résultats sur la couverture terrestre par rapport aux images Landsat à plus haute résolution (30 m) montre que la dynamique attendue des perturbations suivies d'une revégétation a été prise en compte par le produit relatif aux changements de couverture terrestre (Latifovic et Pouliot, 2005). Cette comparaison visuelle montre également que la forme spatiale et l'étendue des grandes perturbations classées par ce produit différaient considérablement, dans certains cas, de l'image Landsat, et ce, en raison de la faible résolution des données AVHRR.

Le CCT a également effectué une comparaison quantitative des résultats sur la couverture terrestre exposés dans le présent rapport avec la base de données SILC (Satellite Database for the Land Cover of Canada, ou base de données satellitaires sur la couverture terrestre au Canada). Cette base de données Landsat à plus haute résolution (30 m) couvre 9 % de la masse terrestre canadienne telle qu'elle apparaissait en 2000. Afin d'établir des comparaisons entre les deux ensembles de données, la base SILC a fait l'objet d'une reclassification à une résolution de 1 km : chaque pixel de 1 km s'est vu attribuer la classe du pixel de 30 m dominant à l'intérieur de celui-ci. Les comparaisons avec cette base de données montrent que la précision globale de la carte de la couverture terrestre de 2000 était de 61,5 %, tandis que la précision des zones reclassées relevées au cours du processus de détection des changements n'était que de 44,0 % (Latifovic et Pouliot, 2005). Ces valeurs pour la carte de la couverture terrestre de 2000 sous-estiment

---

<sup>7</sup> Tandis que les zones brûlées constituent la plus grande partie de cette classe, de très vastes zones exploitées à des fins agricoles ou minières, ainsi que des zones de défoliation grave causée par des insectes, peuvent également y être incluses.

<sup>8</sup> Les classes « territoire urbain », « neige/glace/glacier » et « eaux continentales » n'ont pas été incluses dans l'analyse des changements. Voir les détails à l'annexe I.

vraisemblablement la précision globale, car l'analyse a été limitée aux territoires couverts par la base de données SILC, qui se situent principalement dans des zones de topographie hautement variable qui peuvent facilement donner lieu à des erreurs de classification (p. ex. zones montagneuses et zones de transition entre de vastes biomes).

Il faut être extrêmement prudent lorsque l'on interprète ces résultats pour les écozones<sup>+</sup> renfermant de vastes zones montagneuses (comme l'écozone<sup>+</sup> maritime du Pacifique) ou pour les écozones<sup>+</sup> renfermant de vastes zones de prairies (comme l'écozone<sup>+</sup> des Prairies), du fait que les fluctuations importantes de la disponibilité de l'humidité d'année en année se traduisent par des zones de prairies dont l'aspect, vu de la surface, diffère énormément d'une année à l'autre (Davidson et Wang, 2004 dans Latifovic et Pouliot, 2005). Les changements dans la couverture terrestre des zones constituées de plusieurs petites parcelles de classes différentes (p. ex. écozone<sup>+</sup> des plaines à forêts mixtes et écozone<sup>+</sup> des Prairies) ne seront pas détectés, car les changements se produiront vraisemblablement à une échelle trop petite pour être détectés à cette faible résolution.

En résumé, cet ensemble de données s'avère surtout efficace pour détecter les changements à grande échelle de la couverture terrestre. Les résultats pour chaque écozone<sup>+</sup> devraient être corroborés avec d'autre information, particulièrement en ce qui concerne les changements à petite échelle.

## **Résultats**

La figure 1 montre la couverture terrestre globale pour 2005. Dans la période de 1985 à 2005, des changements ont été principalement détectés dans les classes des forêts et des zones brûlées (figure 2; voir les détails par écozone<sup>+</sup> à l'annexe II). La superficie des zones brûlées a augmenté de 1990 à 2000, mais elle a diminué de 2000 à 2005. Le changement net de 1985 à 2005 a été une augmentation de quelque 200 % (~146 000 km<sup>2</sup>). Durant la même période (de 1985 à 2005), on a observé une réduction nette des zones de forêt, soit d'environ 4 % (~158 000 km<sup>2</sup>). La majeure partie de cette réduction (3,5 de 4,0 %) est attribuable à une transition vers la classe des zones brûlées. Le reste de la réduction nette des zones de forêt au cours de la période est associé à des transitions vers les classes « faible végétation et terres dénudées » (< 1 %), « arbustives » (< 1 %) et « terres agricoles » (< 0,1 %). Les réductions des zones de forêt au cours de la période semblent concentrées dans la partie sud-ouest de la taïga du Bouclier et dans la partie nord-ouest du Bouclier boréal (figure 3).

Un examen plus approfondi des composantes de la classe des terres agricoles dans l'écozone<sup>+</sup> des plaines boréales fait ressortir une tendance de transition de la composante des « terres cultivées/zones boisées » vers celle des « terres cultivées » (Figure 4). Entre 1985 et 2005, 7,7 % (~5 150 km<sup>2</sup>) des terres cultivées/zones boisées ont été perdus, la plus grande partie ayant été convertie en terres cultivées (7,5 % ou ~5 020 km<sup>2</sup>). Les statistiques de 2005 concernant la couverture terrestre ainsi qu'un résumé des changements survenus entre 1985 et 2005 sont présentés à l'annexe II.

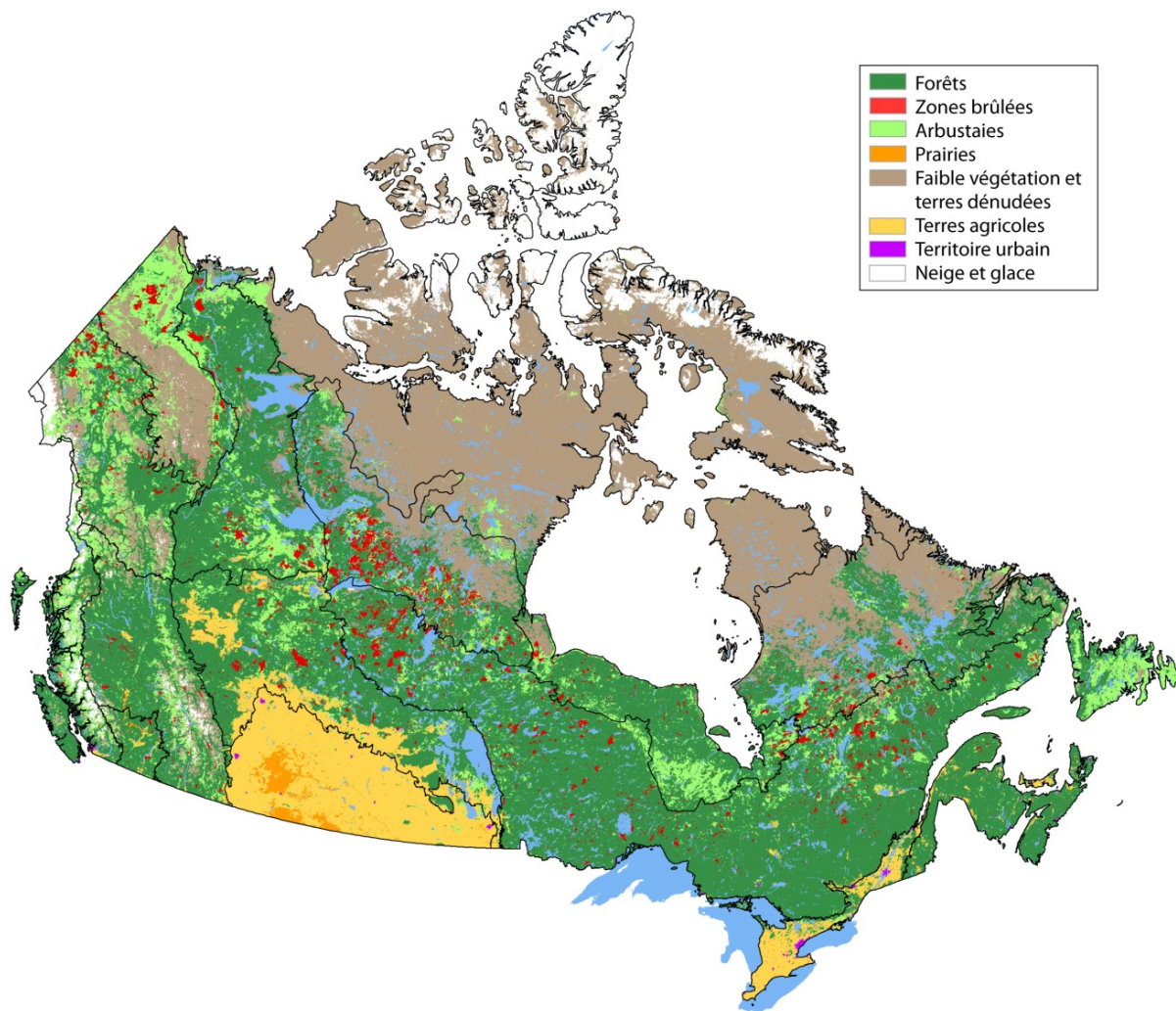


Figure 1. Grandes classes de couverture terrestre au Canada, 2005 (résolution de 1 km).  
 Source : carte dérivée de Latifovic et Pouliot (2005)

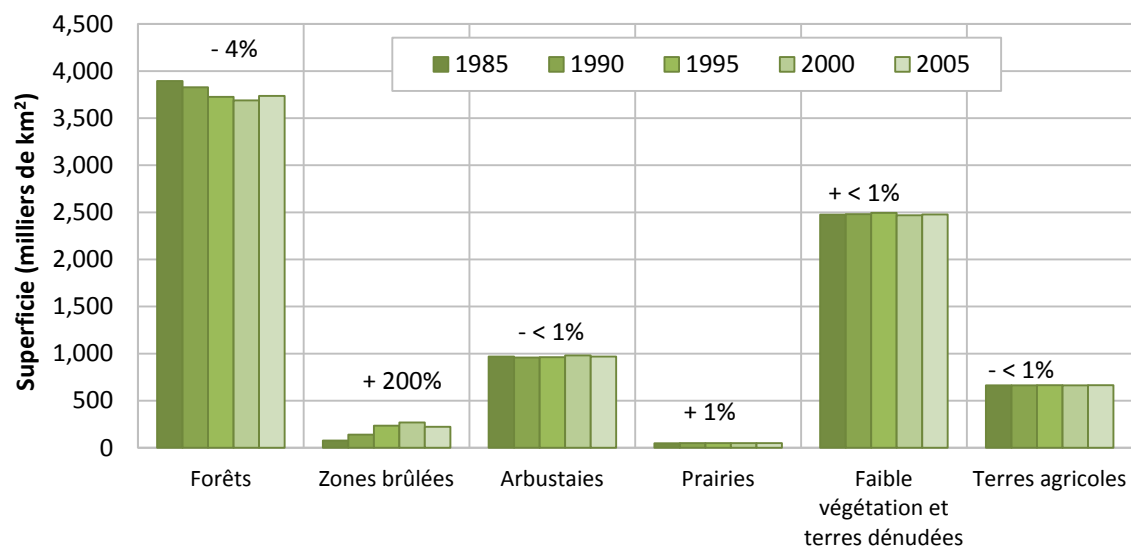


Figure 2. Superficie par classe de couverture terrestre pour l'ensemble du Canada, de 1985 à 2005.

Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe de couverture terrestre entre 1985 et 2005.

Source : données dérivées des statistiques sur la couverture terrestre produites par Latifovic et Pouliot (2005)

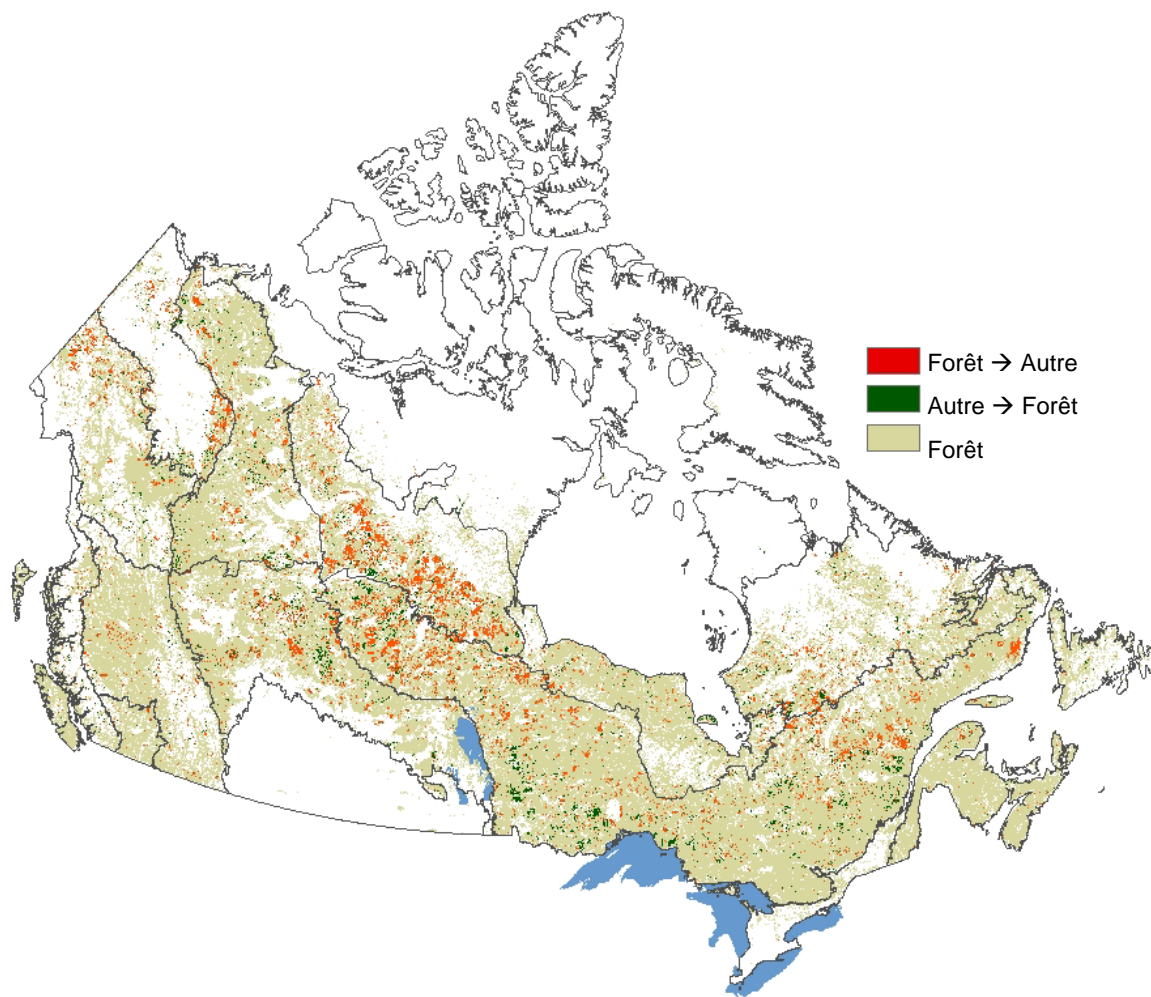


Figure 3. Conversion des zones de forêt en d'autres classes, de 1985 à 2005.  
La plupart des zones de forêt converties sont devenues des zones brûlées.  
Source : carte dérivée des cartes de couverture terrestre produites par Latifovic et Pouliot (2005).



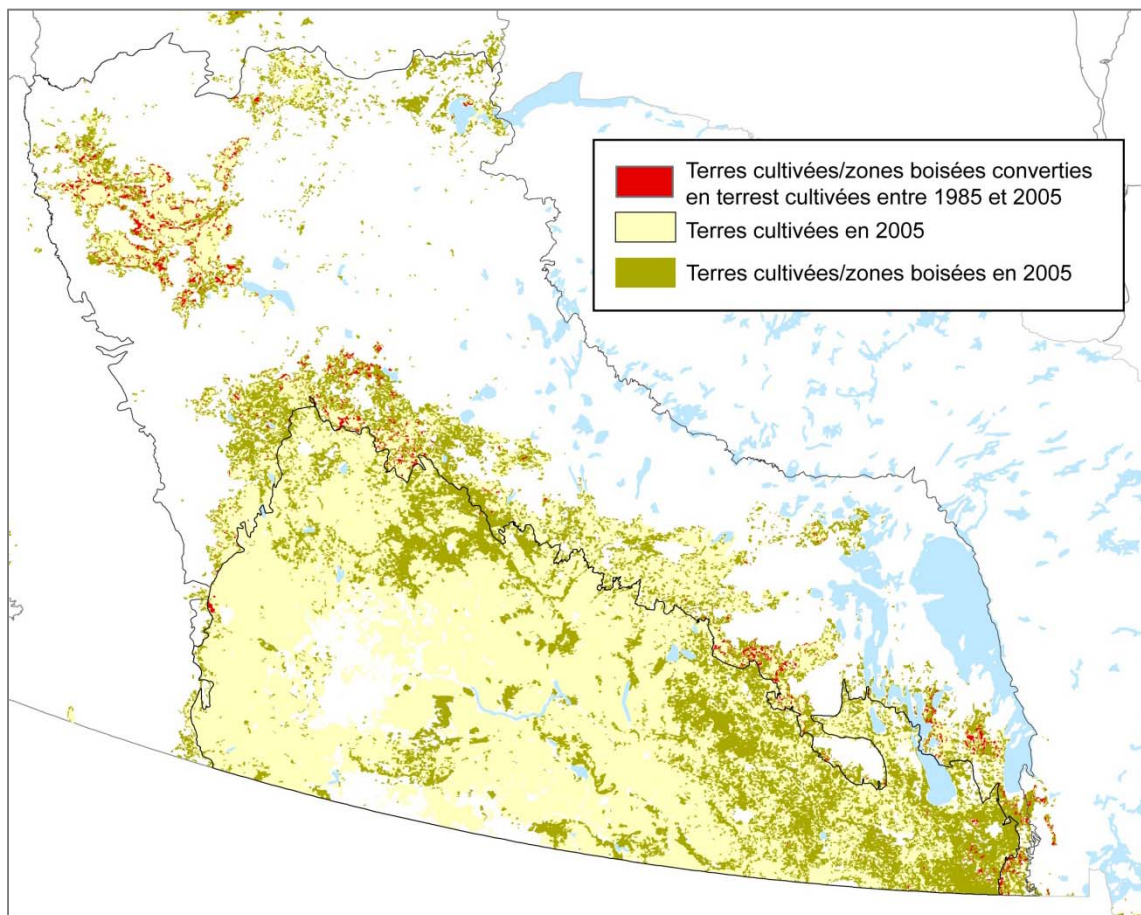


Figure 4. Conversion des terres cultivées/zones boisées en terres cultivées dans les écozones<sup>+</sup> des plaines boréales et des Prairies, de 1985 à 2005.  
Source : carte dérivée des cartes de couverture terrestre produites par Latifovic et Pouliot (2005).

## **Analyse**

Les principaux changements dans la couverture terrestre, comme l'indique l'analyse, se situent dans les classes des zones brûlées et des forêts. La fréquence des incendies est régie par plusieurs facteurs, principalement le temps et le climat, le combustible, la topographie et l'activité humaine (Flannigan et Wotton, 2001; Flannigan *et al.*, 2005; Parisien *et al.*, 2006). L'augmentation de la superficie des zones brûlées jusqu'à 1995 est conforme aux données présentées dans le rapport technique thématique sur les grands incendies au Canada (Krezek-Hanes *et al.*, 2011), qui indique une augmentation globale de la superficie brûlée entre les années 1960 et 1990 ainsi que des années d'activité de feu extrême en 1989, 1994 et 1995. L'augmentation des superficies brûlées depuis les années 1960 jusqu'aux années 1990 a été liée à une présence humaine accrue dans les forêts au cours de cette période et à une augmentation générale des températures au pays (Podur *et al.*, 2002; Gillett *et al.*, 2004; Skinner *et al.*, 2006; Girardin, 2007). Pour en savoir plus sur les tendances liées aux incendies au Canada, y compris les tendances annuelles quant à la superficie brûlée, la gravité et la saisonnalité, voir Krezek-Hanes *et al.*, (2011).

Le changement des composantes des terres agricoles dans l'écozone<sup>+</sup> des plaines boréales, soit la transition des « terres cultivées/zones boisées » vers les « terres cultivées », résulte de la conversion des terres boisées en terres cultivées. Cette constatation est appuyée par le rapport thématique national sur la capacité d'habitat faunique des terres agricoles du Canada (Javorek et Grant, 2011), qui indique que la superficie du territoire classé comme « autres terres<sup>9</sup> » dans la région agricole de l'écozone<sup>+</sup> des plaines boréales a diminué entre 1986 et 2006. La capacité d'habitat faunique, qui permet d'évaluer les grandes tendances de la capacité des terres agricoles canadiennes à offrir un habitat adéquat aux populations des nombreuses espèces de vertébrés terrestres, a aussi considérablement diminué dans l'écozone<sup>+</sup> des plaines boréales durant cette période (Javorek et Grant, 2011).

## **Études de cas sur l'urbanisation**

La majeure partie de la croissance de la population canadienne entre 1996 et 2001 a eu lieu dans quatre principales régions : la vallée du bas Fraser et le sud de l'île de Vancouver en Colombie-Britannique (écozone<sup>+</sup> maritime du Pacifique); le couloir Edmonton-Calgary (écozone<sup>+</sup> des Prairies); la région du Golden Horseshoe de Toronto (écozone<sup>+</sup> des Plaines à forêts mixtes); la région du Grand Montréal (écozone<sup>+</sup> des Plaines à forêts mixtes) (Gurin, 2003). La croissance de la population peut être accommodée par la densification des zones urbaines existantes ou par l'expansion de celles-ci dans les zones non urbaines (ou par « urbanisation », au sens de la présente analyse). Contrairement à d'autres types de changement de la couverture terrestre,

---

<sup>9</sup> Catégorie définie aux fins du Recensement de l'agriculture et qui correspond à peu près à la classe des « terres cultivées/zones boisées » utilisée dans le présent document.

l'urbanisation est généralement permanente (McKinney, 2002). L'urbanisation peut avoir diverses répercussions sur la biodiversité, dont les suivantes :

- une perte directe d'habitat, dont les forêts, les milieux humides et les terres agricoles;
- des changements dans le cycle de l'eau, y compris un ruissellement excessif à la suite de précipitations et un manque d'eau durant les épisodes de sécheresse en raison de l'imperméabilité des zones bâties;
- des obstacles physiques à la dispersion des plantes et des espèces sauvages.

Deux des quatre principales régions de croissance de la population, soit la région du Golden Horseshoe de l'Ontario et la vallée du bas Fraser de la Colombie-Britannique, ont été choisies pour les études de cas. L'imagerie Landsat présente une résolution plus élevée que les données satellitaires AVHRR (utilisées pour montrer les changements de la couverture terrestre à grande échelle dans la section précédente), et elle est devenue plus accessible aux fins des études à grande échelle au cours des dernières années. L'imagerie Landsat a donc été analysée aux fins du présent rapport.

### **La région du Golden Horseshoe**

La région du Golden Horseshoe du sud de l'Ontario s'étend autour de l'extrémité ouest du lac Ontario, de Pickering à Niagara, et comprend la région du Grand Toronto ainsi que les villes de Burlington et de Hamilton. Elle fait partie de l'écorégion des Basses terres du lac Érié de l'écozone<sup>+</sup> des Plaines à forêts mixtes, où la couverture terrestre naturelle est généralement composée de forêts de feuillus et de forêts mixtes (Groupe de travail sur la stratification écologique, 1995). Cette région renferme des zones d'agriculture intensive et fait l'objet d'un aménagement urbain intensif depuis les années 1950. Il s'agit actuellement de la région la plus peuplée et fortement urbanisée du Canada (Statistique Canada, 2012), et elle abrite aussi la majeure partie des espèces en péril de l'Ontario (Wilson, 2008). Les oiseaux et les autres espèces qui vivent dans des milieux humides composent la majorité de ces espèces en péril (Fondation David Suzuki et Ontario Nature, 2011). Les questions d'écologie et de conservation dans la région concernent les menaces pour les forêts et les plantes, le besoin de protéger les milieux humides, la quantité et la qualité de l'eau et les espèces envahissantes (Environnement Canada, 2005).

Bien que la croissance de cette région ne soit pas limitée par des obstacles naturels, le gouvernement de l'Ontario a établi en 2005 une grande ceinture de verdure (plus de 7 600 km<sup>2</sup>) autour de la région du Golden Horseshoe, ainsi que des restrictions en matière de zonage visant à protéger les terres agricoles et naturelles de l'étalement urbain (Government of Ontario, 2005; Ministère des Affaires municipales et du Logement, 2005).

## La vallée du bas Fraser

La vallée du bas Fraser de la Colombie-Britannique prend naissance juste après Mission et Abbotsford, à l'est, et suit le fleuve Fraser jusqu'à son embouchure, dans le détroit de Georgia. Elle comprend la ville de Vancouver et les banlieues environnantes, et fait partie de l'écorégion du bas Fraser de l'écozone<sup>+</sup> maritime du Pacifique. Le climat y est doux et très humide, et la végétation naturelle de la région est dominée par des forêts de douglas côtiers, de pruches de l'Ouest et de thuyas géants (Groupe de travail sur la stratification écologique, 1995). La région plane du delta du Fraser est idéale pour l'agriculture et, sauf en ce qui concerne certaines grandes tourbières, les terres agricoles ont remplacé la couverture terrestre naturelle dans la majeure partie du delta (Environnement Canada, 2005). Comme dans la région du Golden Horseshoe, les terres humides représentent les écosystèmes les plus diversifiés et menacés de la vallée du bas Fraser. Celle-ci comptait autrefois de nombreuses tourbières, mais la plupart ont disparu ou ont été réduites. La tourbière Burns, près de Richmond, est la plus grande tourbière qui persiste dans la région (Hebda *et al.*, 2000).

La vallée du bas Fraser présente des limites considérables à l'urbanisation : l'altitude augmente abruptement au nord du fleuve Fraser, et la frontière des États-Unis freine l'étalement urbain canadien au sud. À l'est, la vallée rétrécit vite. Ces facteurs limitent surtout l'expansion des zones urbaines à la région du delta du Fraser, à l'exception du nord et de l'ouest de Vancouver, où l'expansion atteint les montagnes, au nord.

## Méthodes

Pour les deux études de cas, des cartes de référence de la couverture terrestre pour 1990 sur lesquelles les limites avaient déjà été visuellement interprétées à partir de l'imagerie Landsat TM ont été obtenues auprès de MDA Federal (anciennement EarthSat). Des images Landsat MSS (d'une résolution de 80 m) pour 1974 et 1975 et des images Landsat TM (d'une résolution de 30 m) pour 2005 et 2007 ont quant à elles été obtenues auprès du CCT. Tant la résolution que la séparation spectrale des images Landsat MSS pour 1974 et 1975 étaient plus faibles que celles des images Landsat TM de 1990 et de 2005 et 2007, en raison de l'amélioration que représente le capteur TM par rapport au capteur MSS précédent.

Une image composite infrarouge en fausses couleurs a été produite pour les images Landsat MSS de 1974 et 1975 et pour les images Landsat TM de 2005 et 2007, aux fins de l'amélioration de l'interprétation visuelle. On a délimité manuellement le territoire urbain au moyen d'une comparaison visuelle avec la carte de 1990, en présumant que le territoire urbain de 1974 et 1975 était contenu à l'intérieur de l'étendue de 1990 et que celui de 2005 et 2007 dépassait ces limites.

Une fois les révisions de la carte achevées, les changements du territoire urbain et les changements subséquents des autres classes de couverture terrestre ont été calculés. Les conversions qui ont eu lieu entre les autres classes n'ont pas été détectées par ce processus (par exemple, la conversion de forêts ou d'arbustales en terres agricoles). Le

degré de confiance associé aux résultats de ce processus est très élevé en ce qui concerne les changements du territoire urbain, et moyennement élevé en ce qui a trait à la catégorisation de la couverture terrestre convertie en territoire urbain en 1990 par rapport à 1975 (la partie de la couverture terrestre convertie en territoire urbain de 1990 à 2005 était déjà définie dans la carte de 1990 fournie par MDA Federal). Nous estimons à plus de 90 % la précision des valeurs de la superficie totale.

## Résultats

### La région du Golden Horseshoe

On a observé une augmentation considérable du territoire urbain et des terres dénudées ainsi qu'une perte correspondante de terres agricoles et, dans une moindre mesure, de forêts et d'arbustais dans la région du Golden Horseshoe, de 1974 à 2005 (figure 5 et figure 6). Au total, une superficie de 210 km<sup>2</sup> de terres agricoles a été convertie en territoire urbain ou en terres dénudées durant la première période, soit de 1974 à 1990 (un taux de 13 km<sup>2</sup>/année), et 305 km<sup>2</sup> ont ensuite été convertis de 1995 à 2005 (un taux de 20 km<sup>2</sup>/année). Lorsqu'on tient compte de la perte de forêts et de terres humides, on conclut que le taux d'urbanisation total entre 1974 et 1990 a été de 20 km<sup>2</sup>/année, et que ce taux a grimpé à 23 km<sup>2</sup>/année de 1990 à 2005.

L'expansion du territoire urbain au cours de cette période a été concentrée dans la région des environs de Toronto, et la plus forte croissance a eu lieu entre 1990 et 2005 (figure 6). Sur la rive sud du lac Ontario, la croissance s'est avérée plus modeste. La ville de Hamilton a aussi connu une plus grande croissance entre 1990 et 2005 qu'entre 1974 et 1990. En outre, la croissance urbaine dans la péninsule du Niagara a été minime durant la période d'étude.

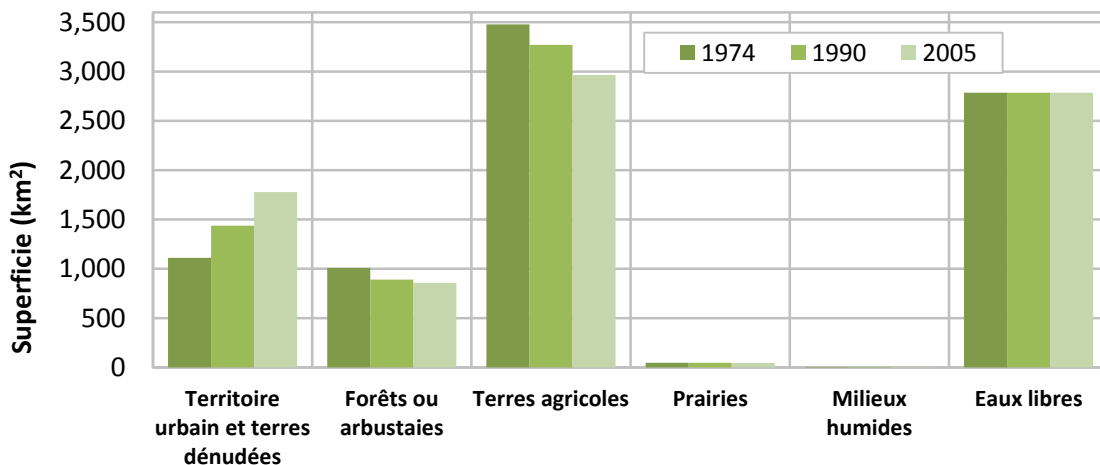


Figure 5. Changements de la couverture terrestre dans la région du Golden Horseshoe de l'Ontario, 1974, 1990 et 2005.

Le graphique indique une augmentation totale de 60 % du territoire urbain et des terres dénudées.

Nota : La résolution de l'image en 1974 était inférieure à celles de 1990 et 2005.

1974



1990



2005

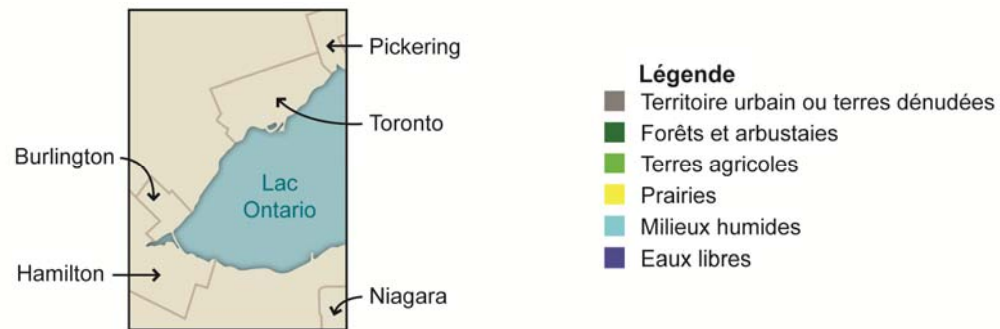


Figure 6. Changements de la couverture terrestre dans la région du Golden Horseshoe de l'Ontario en 1974, 1990 et 2005.

## La vallée du bas Fraser

L'expansion urbaine dans la vallée du bas Fraser a eu lieu principalement dans d'anciennes zones de forêt et d'arbustaie (figure 7 et figure 8) et, dans une moindre mesure, sur des terres agricoles. Au total, 87 km<sup>2</sup> de forêts et d'arbustaises ont été convertis en territoire urbain et en terres dénudées entre 1975 et 1990 (un taux de 6 km<sup>2</sup>/année), et 62 km<sup>2</sup> de forêts et d'arbustaises ont été convertis en territoire urbain de 1990 à 2007 (un taux de 4 km<sup>2</sup>/année). Le taux d'urbanisation moyen pour tous les types de couverture terrestre entre 1975 et 2007 a été de 6 km<sup>2</sup>/année.

La croissance dans la vallée du bas Fraser n'a pas suivi la même tendance que dans la région du Golden Horseshoe. La ville de Vancouver a pris autant d'expansion qu'elle le pouvait, tandis que North Vancouver s'est étendue vers l'ouest, sans toutefois prendre une expansion considérable. En outre, l'expansion urbaine du côté de Richmond n'a pas été forte au cours de la période d'étude. En amont du fleuve Fraser, cependant, l'expansion du territoire urbain est flagrante. Sur la rive sud, la région de Surrey à Delta s'est considérablement étendue. Sur la rive nord, l'expansion du territoire urbain a fait en sorte de combler l'espace entre les villes de Burnaby et de New Westminster, et il en a été de même pour le territoire entre Port Moody et Port Coquitlam. Encore plus loin de Vancouver, la région d'Abbotsford-Clearbrook s'est visiblement étendue (figure 8).



Figure 7. Changements dans la couverture terrestre de la vallée du bas Fraser, en Colombie-Britannique, 1975, 1990 et 2007.

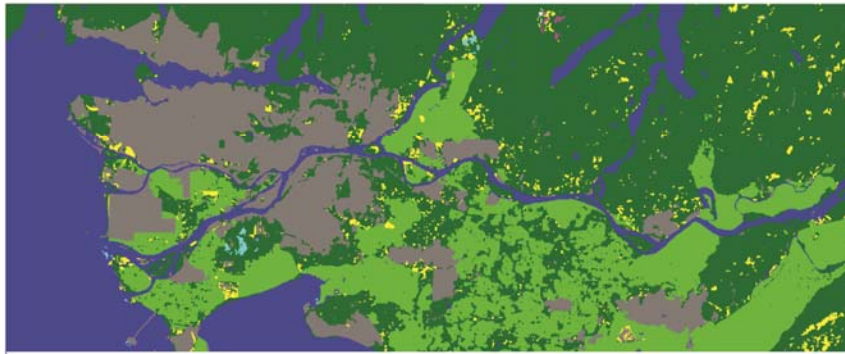
Le graphique montre une augmentation totale de 37 % du territoire urbain et des terres dénudées.

Nota : La résolution de l'image en 1974 était inférieure à celles de 1990 et 2007.

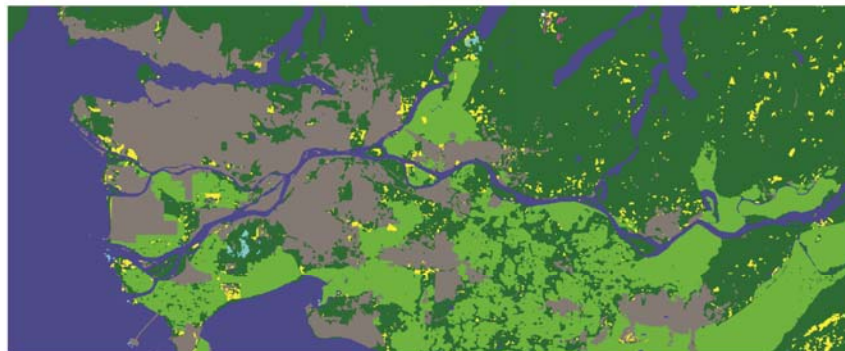




1975



1990



2007

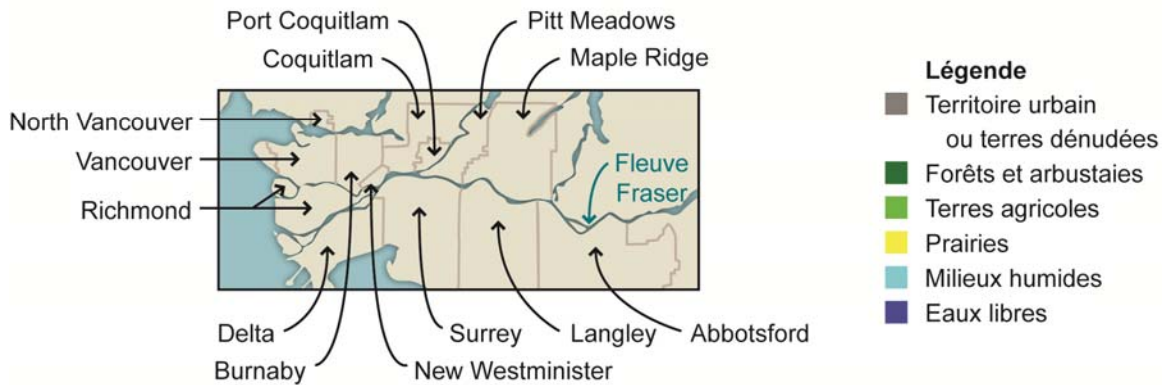


Figure 8. Changements dans la couverture terrestre de la vallée du bas Fraser en 1975, en 1990 et en 2007.



## **Analyse**

Les deux études indiquent une expansion du territoire urbain depuis les années 1970, particulièrement dans la région du Golden Horseshoe de l'Ontario. La croissance urbaine dans cette région a principalement eu lieu aux dépens des terres agricoles (ce qui a aussi été constaté par Cheng et Lee (2008)) et, dans une moindre mesure, des forêts. L'expansion est visiblement centrée autour de Toronto. Le plan de ceinture de verdure du gouvernement de l'Ontario (Ministère des Affaires municipales et du Logement, 2005), entré en vigueur en 2005, vise à protéger une grande superficie (> 7 600 km<sup>2</sup>) de terres bordant la région du Golden Horseshoe contre l'urbanisation. Le taux de croissance de la population dans la région élargie du Golden Horseshoe (qui, telle que définie par Statistique Canada, comprend des régions qui dépassent les limites de la présente analyse, au nord de la baie Georgienne et à l'est de Kawartha), entre 2001 et 2006, a été de 8,4 %. La croissance dans cette région a représenté 84 % de l'augmentation de la population de l'Ontario, et 39 % de celle du Canada au cours de cette période (Statistique Canada, 2012). Une analyse plus poussée de l'urbanisation dans la région permettra d'examiner l'efficacité du plan de ceinture de verdure pour ralentir l'expansion du territoire urbain et d'encourager la « croissance intelligente » (la densification au lieu de l'expansion, voir par exemple Société canadienne d'hypothèques et de logement, 2005).

L'expansion urbaine dans la vallée du bas Fraser, depuis 1975, a principalement eu lieu dans les zones de forêts ou d'arbustales. Au cours des 30 ans qui ont précédé le recensement de 2001, la population de Vancouver et des environs a augmenté de près de 70 %, et la majeure partie de cette croissance s'est produite à l'extérieur des villes principales de Vancouver, de Burnaby et de New Westminster (Gurin, 2003). De 2001 à 2006, le taux de croissance de la population a atteint 6,5 % dans la région, dépassant ainsi la moyenne canadienne de 5,3 %. Cette tendance est associée aux zones qui ont aussi connu la plus grande urbanisation. L'expansion urbaine dans la vallée du bas Fraser se poursuivra vraisemblablement dans les collectivités plus éloignées dans la vallée, puisque la ville de Vancouver et les banlieues avoisinantes ont atteint leurs limites géographiques.

## **INDICE DE VÉGÉTATION PAR DIFFÉRENCE NORMALISÉE (1985-2006)**

Les chercheurs en observation de la Terre ont très tôt, dans l'ère des observations satellitaires, mis au point l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN), qui est maintenant un indicateur reconnu et robuste de la vigueur de la végétation verte et de sa quantité. L'IVDN mesure le contraste entre la réflectance de la radiation solaire rouge, qui est absorbée par la chlorophylle, et la réflectance de la radiation solaire proche infrarouge (NIR), qui est reflétée par la structure interne des feuilles. De façon

plus directe, l'IVDN représente la photosynthèse brute primaire (PBP) (Sellers 1985 et Myneni *et al.* 1995 dans Pouliot *et al.*, 2009) et peut être utilisé comme un indicateur de la superficie des feuilles vertes (Myneni *et al.*, 1998). L'IVDN est calculé dans une zone donnée au moyen de la formule

$$\text{IVDN} = \frac{\text{NIR} - \text{Rouge}}{\text{NIR} + \text{Rouge}}$$

où :

NIR = intensité de la radiation proche infrarouge reflétée;

rouge = intensité de la radiation rouge reflétée.

L'étendue des valeurs de l'IVDN va de -1 à +1. Les nuages, l'eau et la neige se traduisent par des valeurs négatives, les zones dénudées de sol et de roche donnent des valeurs qui se situent autour de 0, et les zones de végétation dense sont associées à des valeurs qui approchent 1. Différents types de végétation ont aussi différentes valeurs d'IVDN. Par exemple, les feuillus de début de succession ont une valeur d'IVDN plus élevée que les conifères de fin de succession (Myneni et Williams, 1994 dans Pouliot *et al.*, 2009).

Plusieurs ensembles de données d'échelle mondiale ont été compilés aux fins de l'IVDN, au moyen de capteurs AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Des méthodes d'analyse différentes des données AVHRR et/ou des analyses réalisées au cours de différentes périodes peuvent donner lieu à des tendances d'IVDN différentes, voire contradictoires (Alcaraz-Segura *et al.*, 2010). L'ensemble de données utilisé dans la présente analyse a été élaboré par le CCT (Pouliot *et al.*, 2009) au moyen de données AVHRR d'une résolution de 1 km (Latifovic *et al.*, 2005). Les chercheurs du CCT ont analysé les tendances concernant le pic annuel atteint par l'IVDN au cours d'une période de 22 ans (de 1985 à 2006), et leurs résultats sont examinés dans le présent document à l'échelle des écozones<sup>†</sup>. Les changements de l'IVDN sont utilisés comme indicateurs des changements survenus dans la productivité primaire.

## Méthodes

Pouliot *et al.* (2009) ont mis sur pied une approche complète et rigoureuse pour le traitement des nouvelles images composites AVHRR sur 10 jours, d'une résolution de 1 km, et pour l'analyse des résultats. Ils ont moyenné les données dans l'espace à une résolution de 3 km, et ont calculé les valeurs maximales annuelles de saison de croissance en établissant la moyenne des trois valeurs d'IVDN les plus fortes pour toutes les images composites de juillet-août. Le caractère significatif des tendances analysées pour chaque site a été évalué selon un intervalle de confiance de 95 %, au moyen du test de Mann-Kendall. Les cartes ne montrent donc que les sites pour lesquels les tendances sont significatives. Les méthodes détaillées sont décrites dans Pouliot *et al.* (2009).

L'ensemble de données du CCT a permis d'améliorer les corrections et d'obtenir une résolution supérieure à celle de l'ensemble de données GIMMS (Global Inventory

Monitoring and Modeling Studies), soit l'ensemble de données IVDN à l'échelle mondiale le plus utilisé à l'heure actuelle.

Dans le présent document, les tendances significatives ( $p < 0,05$ ) sont présentées par écozone<sup>+</sup> et comparées visuellement à la carte de la couverture terrestre de 1995 (voir Changements dans la couverture terrestre, à la page 3), de manière à faciliter l'analyse des tendances de l'IVDN relatives à la couverture terrestre.

Pouliot *et al.* (2009) ont également examiné l'incidence du climat et des changements dans la couverture terrestre sur les tendances observées concernant l'IVDN. Ils ont examiné l'incidence du climat en calculant un indice de l'incidence des tendances climatiques (IITC) pour chaque région d'après une analyse de corrélation entre les données rectangulaires sur les températures et les précipitations moyennes (Mitchell 2005 dans Pouliot *et al.*, 2009) et les pics annuels de l'IVDN. Une analyse de l'incidence des changements dans la couverture terrestre sur l'IVDN a été menée dans les régions pour lesquelles des données de séries chronologiques Landsat (régions 5, 6 et 8 dans la figure 9) ou des données du Recensement de l'agriculture (région 7 dans la figure 9) étaient disponibles. Ces résultats sont exposés dans le présent document par écozone<sup>+</sup>.

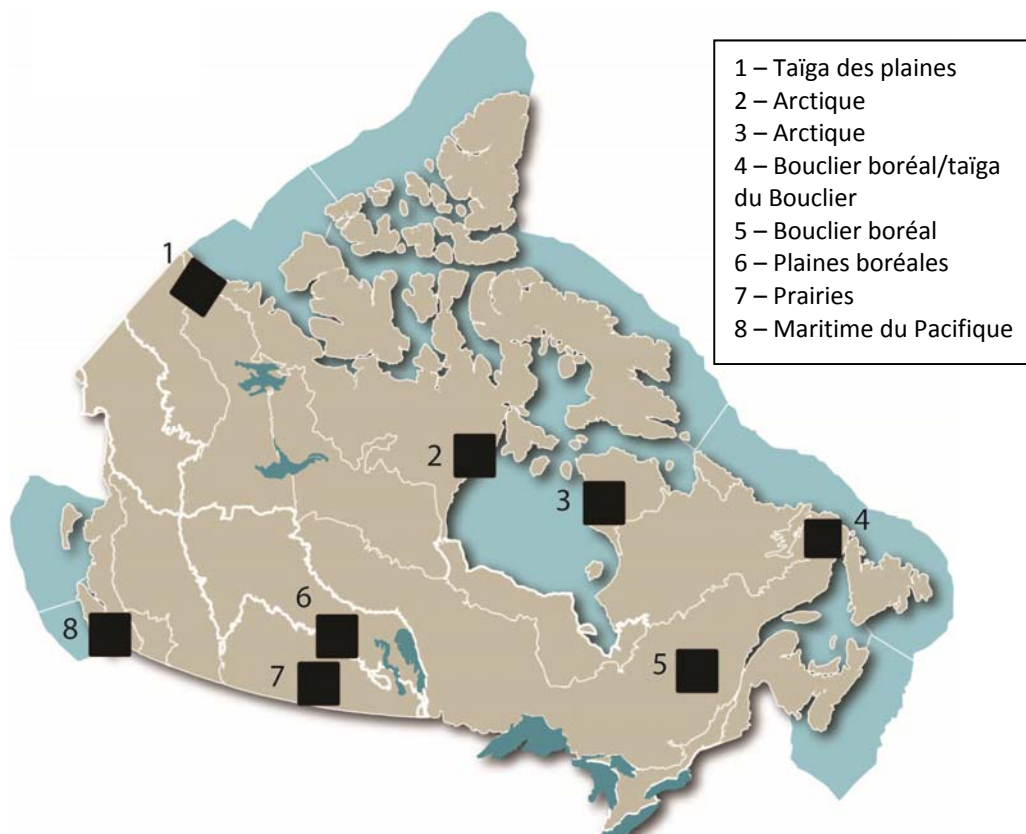


Figure 9. Régions étudiées dans le but d'analyser l'incidence du forçage climatique et de la nature de la couverture terrestre sur les tendances affichées par l'IVDN. Les régions 1 à 4 sont considérées comme étant septentrionales, tandis que les régions 5 à 8 sont considérées comme étant méridionales.

Source : carte adaptée de Pouliot et al. (2009).

## Vérifications de la qualité et limites

Dans les régions où le sol est visible, la réflectance de celui-ci peut agir sur la valeur de l'IVDN. L'apparence de changements du sol basés sur la teneur en humidité et, conséquemment, sur l'humidité du sol, agit aussi sur l'IVDN dans les régions où la végétation est faible ou modérée et laisse voir le sol (Huete et Jackson, 1987; Huete et Jackson, 1988). L'IVDN est aussi limité par le fait qu'il devient moins sensible aux changements de la verdure à mesure que sa valeur augmente. Par exemple, plus la valeur de l'IVDN se rapproche de 1, plus l'augmentation de la verdure devra être grande pour hausser cette valeur d'un même incrément (Gilabert *et al.*, 1996; Santin-Janin *et al.*, 2009).

Deux vérifications de la qualité ont été réalisées sur l'ensemble de données IVDN AVHRR sur 1 km utilisé dans la présente analyse (Pouliot *et al.*, 2009). La première vérification consistait à comparer quantitativement cet ensemble de données sur l'IVDN avec un autre ensemble de données sur l'IVDN dérivé de données Landsat à haute résolution (30 m) pour deux régions de toundra (la région 1 de l'écozone<sup>+</sup> de la taïga des plaines et la région 3 de l'écozone<sup>+</sup> de l'Arctique, voir la figure 9). Les tendances affichées par l'IVDN, calculées d'après l'ensemble de données AVHRR (résolution d'un kilomètre), correspondaient bien avec les données Landsat, avec une erreur absolue moyenne de 4,5 % dans la région 1 et de 6,8 % dans la région 3.

La deuxième vérification de la qualité consistait à examiner les tendances affichées par l'IVDN dans toutes les zones brûlées entre 1960 et 2004 (2004 base de données sur les incendies de Fraser *et al.*, 2004 et Zhang *et al.*, 2004 a,b dans Pouliot *et al.*, 2009) dans les huit régions afin de vérifier si l'on pouvait observer la dynamique attendue d'incendies et de régénération. Dans les zones récemment touchées par des feux (1994-2004), on a constaté que les tendances affichées par l'IVDN étaient toutes négatives, ce qui est vraisemblablement dû à la quantité réduite de végétation présente. Les tendances étaient positives dans les zones touchées par des feux entre 1980 et 1990 du fait que la régénération aurait prédominé. Les tendances étaient généralement positives ou voisines de zéro dans les zones touchées par des feux avant 1980 (1960-1980). Ces résultats donnent à penser qu'il existe une concordance raisonnable entre les tendances attendues et observées affichées par l'IVDN.

## Résultats

Dans une proportion de 22 % du territoire canadien, l'IVDN affichait une tendance significativement positive ( $p < 0,05$ ), tandis que seulement 0,5 % était associé à une tendance significativement négative de ce même indice (figure 10). Une petite zone dans l'écozone<sup>+</sup> des Prairies, proche de l'Alberta, de la Saskatchewan et de la frontière américaine, affichait une tendance négative. De plus, un certain nombre de parcelles associées à des tendances négatives ont été relevées dans l'ouest des écozones<sup>+</sup> du Bouclier boréal et de la taïga du Bouclier, dans le sud de l'écozone<sup>+</sup> de la taïga des

plaines et dans le centre-ouest de la Cordillère montagnarde, ce qui correspond aux zones touchées par le dendroctone du pin ponderosa.



Figure 10. Tendances significatives ( $p < 0,05$ ) affichées par l'IVDN entre 1985 et 2006.  
Source : carte adaptée de Pouliot et al. (2009).

Bien que largement réparties dans tout le pays, les tendances positives les plus marquées étaient observées dans les régions de la toundra et de la taïga arctique, de la toundra alpine, sur la côte du Pacifique et dans l'est des Prairies. L'écozone<sup>+</sup> de la forêt boréale de Terre-Neuve affichait le plus haut pourcentage de terres associées à des tendances positives, celles-ci étant observées sur près de 41 % de la superficie de l'écozone<sup>+</sup> (figure 10, tableau 1).

L'analyse du forçage climatique effectuée par Pouliot *et al.* (2009) a révélé une relation linéaire modérée pour toutes les régions (voir la figure 9 à la page 19 pour une liste des régions analysées), les variables de la température étant les plus étroitement corrélées aux tendances affichées par l'IVDN dans les régions septentrionales (régions 1 à 4), et

celles des précipitations étant les plus étroitement corrélées aux tendances affichées par l'IVDN dans les régions méridionales (régions 5 à 8). L'IITC montre que les tendances affichées par l'IVDN dans les régions septentrionales subissent plus fortement l'incidence du climat que dans les régions méridionales.

Les résultats de l'analyse des répercussions des changements dans la couverture terrestre indiquent que la tendance positive affichée par l'IVDN dans le sud résulte principalement des changements dans la couverture terrestre, particulièrement sur l'île de Vancouver, dans l'écozone<sup>+</sup> maritime du Pacifique, où une succession vigoureuse suivant des coupes a mené à une hausse de l'IVDN, ainsi que dans l'écozone<sup>+</sup> des Prairies, où la hausse de l'IVDN correspond à une expansion des terres cultivées (Pouliot *et al.*, 2009).

Tableau 1. Superficies des zones où les tendances affichées par l'IVDN sont à la hausse et en baisse, par écozone<sup>+</sup>, entre 1985 et 2006

Écozone <sup>+</sup>	Superficie avec tendance ↑ (km <sup>2</sup> )	Superficie avec tendance ↓ (km <sup>2</sup> )
Arctique	2 281 558 (12,2 %)	3 303 (0,1 %)
Taïga des plaines	116 163 (22,7 %)	7 470 (1,5 %)
Taïga du Bouclier	415 278 (36,5 %)	8 730 (0,8 %)
Bouclier boréal	335 205 (21,0 %)	14 742 (0,9 %)
Maritime de l'Atlantique	33 408 (16,5 %)	720 (0,4 %)
Plaines à forêts mixtes	15 876 (20,8 %)	666 (0,6 %)
Plaines boréales	130 554 (35,1 %)	3 861 (0,6 %)
Prairies	157 491 (35,3 %)	1 116 (0,2 %)
Taïga de la Cordillère	118 449 (23,8 %)	189 (0,1 %)
Cordillère boréale	103 833 (32,2 %)	594 (0,1 %)
Maritime du Pacifique	63 864 (29,8 %)	387 (0,2 %)
Cordillère montagnarde	122 391 (4,9 %)	4 527 (1,1 %)
Plaines hudsoniennes	16 713 (4,9 %)	405 (0,1 %)
Bassin intérieur de l'Ouest	16 713 (30,1 %)	1 035 (1,9 %)
Forêt boréale de Terre-Neuve	43 290 (40,9 %)	0 (0 %)
<b>Total au Canada</b>	<b>1 967 535 (22,3 %)</b>	<b>47 745 (0,5 %)</b>

## **Écozone<sup>+</sup> de l'Arctique**

Les secteurs de l'écozone<sup>+</sup> de l'Arctique qui affichent des hausses notables de l'IVDN englobent la partie nord de l'île Banks, les péninsules Dundas et Sabine de l'île Melville, la rive sud de la baie Bowman sur l'île de Baffin, la zone située le long de la rive nord-ouest de la baie d'Hudson et la partie de la péninsule du Labrador située dans l'écozone<sup>+</sup> de l'Arctique, principalement les plus faibles élévations bordant la baie d'Ungava (figure 10). Tous ces secteurs (à l'intérieur de l'écozone<sup>+</sup> de l'Arctique) présentent une végétation de toundra.

L'IITC calculé pour les régions 2 et 3 (figure 9, en page 19) par Pouliot *et al.* (2009) révèle que les tendances de l'IVDN dans ces régions de l'écozone<sup>+</sup> de l'Arctique sont fortement influencées par le climat. De manière générale, l'IVDN dans les régions nordiques (régions 1 à 4, figure 9) a été corrélé de manière négative aux précipitations et de manière positive à la température (Pouliot *et al.*, 2009).

Olthof *et al.* (2008) ont examiné les tendances affichées par l'IVDN dans une partie de l'écozone<sup>+</sup> de l'Arctique correspondant *grosso modo* à la région 3 (figure 9) en utilisant le même ensemble de données AVHRR sur l'IVDN que celui sur lequel repose la présente analyse ainsi que des données Landsat à résolution élevée (30 m). Ils ont constaté que les communautés dominées par des lichens affichent, de façon constante, des tendances d'IVDN plus basses que les communautés dominées par des plantes vasculaires, même si toutes affichent des tendances à la hausse. Ce résultat est conforme à ceux des études réalisées au sol (Arft *et al.*, 1999; par exemple Sturm *et al.*, 2001; Hollister *et al.*, 2005; Tape *et al.*, 2006; Walker *et al.*, 2006) et a été attribué à l'augmentation de la vigueur et de la biomasse des plantes vasculaires ainsi qu'à une croissance moindre des lichens due à la sécheresse (Olthof *et al.*, 2008).

## **Écozone<sup>+</sup> de la taïga des plaines**

Une vaste zone associée à une forte augmentation de l'IVDN a été délimitée dans la région septentrionale de cette écozone<sup>+</sup>, correspondant à une vaste forêt de conifères s'étendant du nord du Grand lac de l'Ours jusqu'à l'est de la vallée du Mackenzie. Une parcelle semblable mais de plus petite dimension associée à une augmentation de l'IVDN a été découverte dans la vallée du bas Mackenzie. Plus au sud, les zones associées à des hausses de l'IVDN sont plus isolées. Un secteur, qui n'a connu aucun incendie récent et où l'on enregistre un déclin de l'IVDN, se trouve à l'ouest du Grand lac des Esclaves.

La région 1 (figure 9 en page 19), utilisée au cours de l'analyse du forçage climatique menée par Pouliot *et al.* (2009), se situe à l'intérieur de l'écozone<sup>+</sup> de la taïga des plaines. L'IITC calculé pour cette région révèle que l'IVDN subit fortement l'incidence du climat, avec une valeur plus élevée de l'IITC que pour toutes les autres régions analysées. En général, l'IVDN dans les régions septentrionales (régions 1 à 4, figure 9 en page 19) était négativement corrélé aux précipitations et positivement corrélé à la température (Pouliot *et al.*, 2009).

Olthof *et al.* (2008) ont examiné les tendances affichées par l'IVDN dans une partie de l'écozone<sup>+</sup> de la taïga des plaines correspondant *grosso modo* à la région 1 de la figure 9 en utilisant le même

ensemble de données AVHRR sur l'IVDN que celui sur lequel repose la présente analyse ainsi que des données Landsat à haute résolution (30 m). Ils ont constaté que les communautés dominées par des lichens affichent, de façon constante, des tendances d'IVDN plus basses que les communautés dominées par des plantes vasculaires, même si toutes affichent des tendances à la hausse. Ce résultat est conforme à ceux des études réalisées au sol (Arft *et al.*, 1999; par exemple Sturm *et al.*, 2001; Hollister *et al.*, 2005; Tape *et al.*, 2006; Walker *et al.*, 2006) et a été attribué à l'augmentation de la vigueur et de la biomasse des plantes vasculaires ainsi qu'à une croissance moindre des lichens due à la sécheresse (Olthof *et al.*, 2008).

### **Écozone<sup>+</sup> de la taïga du Bouclier**

Les tendances affichées par l'IVDN ont augmenté dans une zone de taille appréciable située dans la partie nord-est de l'écozone<sup>+</sup> (figure 10). Les hausses étaient les plus prononcées au sud de la baie d'Ungava, une région dominée par une végétation de toundra, et au sud du Labrador, une région dominée par des forêts de conifères et des arbustaias. La zone qui s'étend entre ces deux « points chauds » présente également une tendance positive, quoique moins prononcée, au cours de la même période. La tendance positive observée au sud de la baie Hamilton et du lac de Melville, au Labrador, n'a pas été observée dans la plupart des autres études, à l'exception de celle de Slayback *et al.* (2003) dont les analyses donnent à penser que la hausse des tendances affichées par l'IVDN dans ce secteur est récente. Une zone de taille appréciable associée à un IVDN affichant des tendances à la hausse a également été découverte dans la partie nord-ouest de la taïga du Bouclier. Cette zone est principalement couverte de forêts de conifères, mais l'on y trouve aussi des arbustes et de la végétation de toundra.

La région 4, telle que définie au cours de l'analyse du forçage climatique menée par Pouliot *et al.* (2009), est incluse dans la partie est de l'écozone<sup>+</sup> de la taïga du Bouclier. L'IITC calculé pour cette région révèle que l'IVDN y subit fortement l'effet du climat, bien qu'un peu moins que dans les écozones<sup>+</sup> de la taïga des plaines et de l'Arctique. En général, l'IVDN dans les régions septentrionales (régions 1 à 4, figure 9) était négativement corrélé aux précipitations et positivement corrélé à la température (Pouliot *et al.*, 2009).

### **Écozone<sup>+</sup> du Bouclier boréal**

La zone marquée par des tendances significativement positives affichées par l'IVDN au sud du Labrador se poursuit dans l'est de l'écozone<sup>+</sup> du Bouclier boréal, au Québec, principalement dans des secteurs couverts de forêts de conifères, mais aussi dans des arbustaias. Dans cette région, la tendance positive n'a pas été observée dans la plupart des autres études, à l'exception de celle de Slayback *et al.* (2003), dont les analyses donnent à penser que la hausse des tendances affichées par l'IVDN dans ce secteur est récente. De fortes hausses ont été observées dans des zones isolées situées plus à l'ouest, au centre du Québec, les plus fortes hausses ayant été observées dans des arbustaias. Plus à l'ouest, une parcelle importante de forêts mixtes située juste au nord du lac Supérieur affichait des tendances à la hausse, de même qu'une parcelle semblable située juste à l'ouest du lac Nipigon. Encore plus à l'ouest, on a observé bon nombre de parcelles isolées affichant des valeurs positives de l'IVDN ainsi qu'un plus faible nombre affichant des valeurs négatives pour cet indice. Les tendances de l'indice dans cette zone sont



liées au processus dynamique de feux de friches et de régénération qui est fréquemment observé dans la partie ouest de l'écozone<sup>+</sup> du Bouclier boréal. Ce ne sont pas toutes les hausses de l'IVDN observées pour cette région qui résultent de la régénération consécutive aux incendies. Dans le cadre d'une analyse de sites récemment brûlés et non brûlés reposant sur le même ensemble de données AVHRR sur l'IVDN concernant la région de la forêt boréale du centre du Canada, Alcaraz-Segura *et al.* (2010) ont observé des hausses de l'IVDN dans tous les sites récemment brûlés (depuis 1984) et dans la moitié des sites non brûlés analysés.

Les régions 4 et 5 telles que définies au cours de l'analyse du forçage climatique de Pouliot *et al.* (2009), correspondent aux parties québécoises nord-est et centre-sud de l'écozone<sup>+</sup> du Bouclier boréal. Les IITC calculés pour ces régions révèlent que l'IVDN, dans la région nord-est du Bouclier boréal, subit fortement l'effet du climat, tandis que l'IVDN dans la région québécoise centre-sud du Bouclier boréal subit moins l'effet du climat. En général, l'IVDN dans les régions septentrionales (régions 1 à 4) était négativement corrélé aux précipitations et positivement corrélé à la température tandis que, dans les régions méridionales (régions 5 à 8), il était positivement corrélé aux précipitations et négativement corrélé à la température (Pouliot *et al.*, 2009).

### ***Écozone<sup>+</sup> maritime de l'Atlantique***

L'IVDN a connu une hausse significative dans les zones de forêts mixtes qui se trouvent le long de la Gaspésie et sur la plus grande partie de l'île du Cap-Breton (figure 10). Les tendances à la hausse pourraient être associées à l'exploitation forestière commerciale, qui s'est traduite par une augmentation de la proportion d'arbres feuillus, mais l'on doit mener des études plus détaillées si l'on veut confirmer cette hypothèse. Il est important de noter que les forêts à feuilles caduques et les forêts mixtes à feuilles caduques, qui constituent une grande partie de cette écozone<sup>+</sup>, affichent des valeurs de l'IVDN proches du point de saturation (Myneni et Williams, 1994 dans Pouliot *et al.*, 2009), (voir Vérifications de la qualité et limites, à la page 20) ce qui rend plus difficile la détection des légères variations de l'IVDN.

### ***Écozone<sup>+</sup> des plaines à forêts mixtes***

Cette écozone<sup>+</sup> est dominée par les modifications humaines du paysage associées à l'aménagement urbain, à la culture à grande échelle et à l'exploitation forestière à des fins commerciales. On a relevé quelques zones associées à un IVDN affichant des tendances négatives, à l'ouest de Toronto; ces zones sont probablement touchées par l'expansion urbaine. De vastes zones où les tendances affichées par l'IVDN sont positives ont été découvertes, la plupart du temps sur des territoires agricoles. Une analyse plus détaillée s'impose si nous voulons attribuer une cause à ces tendances et interpréter leur importance sur le plan écologique.

## **Écozone<sup>+</sup> des plaines boréales**

Les tendances significatives affichées par l'IVDN étaient généralisées mais variables. La plus grande partie de l'écozone<sup>+</sup> qui affichait des tendances positives se trouvait dans le territoire agricole, et l'on pouvait observer certaines parcelles associées à de fortes tendances positives dans la forêt et dans l'arbustaie au sud et à l'ouest du lac Athabasca. Deux petites parcelles dont l'IVDN affichait des tendances fortement négatives semblaient être associées à l'exploitation des sables bitumineux de l'Athabasca.

## **Écozone<sup>+</sup> des Prairies**

L'IVDN d'une petite partie de l'écozone<sup>+</sup> des Prairies s'étendant, dans le sud de l'Alberta, entre le lac Pakowki et la limite de la Saskatchewan, affichait une forte tendance négative. L'IVDN de la plupart des autres secteurs de cette écozone<sup>+</sup> affichait des tendances positives significatives, en particulier en Alberta, à l'ouest de Lethbridge, et en Saskatchewan, à l'ouest de Moose Jaw (figure 10).

Dans une zone aride telle que l'écozone<sup>+</sup> des Prairies, l'humidité joue un rôle important dans la valeur de l'IVDN, parce que la verdure de la végétation dans cette écozone<sup>+</sup> est très sensible à la quantité et au moment des précipitations. Il est possible que l'augmentation de la verdure qui a suivi la période de sécheresse ayant sévi de 2000 à 2002 (Bonsal et Regier, 2007) puisse être responsable de la tendance positive affichée par l'IVDN. En outre, on a constaté que les augmentations des tendances affichées par l'IVDN dans la partie saskatchewanaise de l'écozone<sup>+</sup> étaient fortement corrélées à l'augmentation de la superficie occupée par le territoire agricole, ce qui semble indiquer que la couverture terrestre est un déterminant important des tendances affichées par l'IVDN dans cette écozone<sup>+</sup> (Pouliot *et al.*, 2009).

Les augmentations de l'IVDN dans cette écozone<sup>+</sup> ont aussi été montrées par Slayback *et al.* (2003), Zhou *et al.* (2001) et Tateishi et Ebata (2004).

## **Écozone<sup>+</sup> de la taïga de la Cordillère**

L'IVDN s'est élevé de façon significative dans les zones d'arbustes et de végétation de toundra situées au sud des monts Mackenzie et s'étendant à l'ouest de la vallée du Mackenzie (figure 10).

## **Écozone<sup>+</sup> de la Cordillère boréale**

Une zone vaste mais irrégulière affichant un IVDN à la hausse a été délimitée dans la région centrale de cette écozone<sup>+</sup>, marquée par la présence éparse de conifères, d'arbustes et de végétation de toundra (figure 10). Bien qu'un IITC n'ait pas été calculé pour cette écozone<sup>+</sup>, il est probable que les tendances affichées par l'IVDN soient corrélées au climat, puisqu'un réchauffement marqué (particulièrement en hiver) a lieu dans cette écozone<sup>+</sup> (Zhang *et al.*, 2011) et que la majeure partie de la Cordillère boréale demeure un milieu sauvage intact (Secrétariat du RETE, 2011).

## **Écozone<sup>+</sup> maritime du Pacifique**

L'IVDN a augmenté sur de vastes parties de cette écozone<sup>+</sup> (figure 10). En particulier, la plus grande partie de l'île de Vancouver a enregistré une hausse significative de l'IVDN. Les tendances à la hausse affichées par cet indice sur l'île de Vancouver (région 8 dans figure 9) étaient fortement corrélées aux changements survenus dans la couverture terrestre (Pouliot *et al.*, 2009).

## **Écozone<sup>+</sup> de la Cordillère montagnarde**

L'IVDN a augmenté dans la plus grande partie de l'écozone<sup>+</sup>, notamment à des altitudes plus élevées où dominent les arbustes et la végétation de toundra (figure 10). À des altitudes moindres, les hausses de l'IVDN ont été principalement observées dans des zones de forêts mixtes. Ces zones de faible altitude associées à une hausse de l'IVDN pourraient représenter des mélanges de peuplements forestiers adultes et de blocs de coupe à des stades précoces de succession, qui affichent des valeurs de l'IVDN supérieures à celles que l'on observe pour les forêts de conifères adultes. Les tendances négatives constatées dans le centre de la Colombie-Britannique correspondent à une zone connue de dommages dus au dendroctone du pin ponderosa, qui est présent dans la zone depuis 1994 environ (BCMF, 2003 dans Pouliot *et al.*, 2009). L'étendue de la zone associée à un IVDN affichant des tendances négatives (figure 10) est plus faible que celle de la zone correspondant aux dépeuplements dus au dendroctone du pin ponderosa en raison de la résolution des données AVHRR, des variations locales de la gravité des dommages et de la place de la perturbation dans la série chronologique. Il est possible que des dommages plus récents (survenus entre 2003 et 2006) ne soient pas pris en considération, car ces points peuvent être vus comme des valeurs aberrantes dans l'analyse robuste des tendances observées (Pouliot *et al.*, 2009).

## **Écozone<sup>+</sup> des plaines hudsoniennes**

Une partie relativement restreinte de cette écozone<sup>+</sup> était associée à des tendances significatives affichées par l'IVDN. Les zones où l'IVDN avait augmenté se situaient dans les basses terres de l'écozone<sup>+</sup>, qui sont dominées par les milieux humides (figure 10).

## **Écozone<sup>+</sup> du bassin intérieur de l'Ouest**

L'IVDN a augmenté dans cette écozone<sup>+</sup>, dans des parties couvertes de forêts mixtes, et cette hausse pourrait résulter de la régénération qui a suivi une exploitation forestière à grande échelle (figure 10). L'indice a décliné de manière significative sur une superficie éparse représentant environ 2 % de cette écozone<sup>+</sup>, dans des zones qui sont classées principalement comme forêts de conifères. La cause de ces tendances négatives est inconnue. Les tendances négatives affichées par l'IVDN peuvent indiquer l'occurrence de sécheresse dans l'écozone, bien qu'une analyse de l'indice Palmer de gravité des sécheresses dans cette écozone<sup>+</sup> entre 1950 et 2006 n'ait pas révélé l'existence de changements significatifs au cours de cette période (Zhang *et al.*, 2011).

## **Écozone<sup>+</sup> de la forêt boréale de Terre-Neuve**

La plus grande proportion (41 %) (figure 10 et tableau 1. ) de la zone affichant un IVDN en hausse se trouve dans cette écozone<sup>+</sup>. La majorité de la zone centre-nord de Terre-Neuve présentait une hausse de l'IVDN. Cette hausse semble trouver son centre au sud de la ville de Grand Falls-Windsor. Le secteur est caractérisé par une vaste arbustaie et un faible couvert forestier. Il est possible que le réchauffement climatique ait permis à cette végétation limitée par le climat de gagner en densité et en vigueur.

## **Analyse**

Plusieurs études à long terme de l'IVDN reposant sur des données recueillies par des capteurs AVHRR embarqués sur des satellites météorologiques à orbite polaire de la NOAA ont révélé des hausses statistiquement significatives sur un territoire allant de l'Alaska jusqu'à la baie d'Ungava au cours de différentes périodes s'échelonnant des années 1980 à aujourd'hui (Myneni *et al.*, 1997; par exemple Los *et al.*, 2000; Kawabata *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2001; Slayback *et al.*, 2003; Goetz *et al.*, 2005). Le consensus, parmi les scientifiques, veut que l'on attribue ces changements aux effets du changement climatique, plus particulièrement au réchauffement. Des études plus détaillées ont montré qu'il y avait une augmentation des superficies couvertes d'herbes et d'arbustes (Arft *et al.*, 1999; par exemple Sturm *et al.*, 2001; Hollister *et al.*, 2005; Tape *et al.*, 2006; Walker *et al.*, 2006; Olthof *et al.*, 2008; Olthof et Pouliot, 2010) qui, par ricochet, pourraient entraîner des hausses à long terme de l'IVDN. Combinée aux observations sur place, l'analyse des tendances affichées par l'IVDN fournit des indications supplémentaires que les effets du changement climatique se produisent déjà dans les régions septentrionales.

Plus au sud, les zones associées à des augmentations des tendances affichées par l'IVDN méritent d'être étudiées, car ces tendances varient selon la période d'analyse et l'ensemble de données utilisé. Même si aucune étude ne montre de grandes zones de réduction de l'IVDN, d'autres activités de recherche ont relevé davantage de parcelles associées à des tendances négatives de l'IVDN dans la forêt boréale au moyen de l'ensemble de données GIMMS AVHRR, d'une résolution de 8 km (Goetz *et al.*, 2005; Bunn et Goetz, 2006). Ces tendances ont été attribuées à des facteurs potentiels comme les incendies, le stress de sécheresse, la limitation des nutriments et les dommages causés par les maladies et les insectes. Une comparaison effectuée entre les deux ensembles de données a montré que l'ensemble de données GIMMS pourrait présenter un biais en faveur des tendances négatives (Alcaraz-Segura *et al.*, 2010). Comme les résultats indiquent un risque de réduction de la productivité primaire dans les zones de forêt boréale (qui agirait sur le bilan du carbone), il importe d'effectuer un suivi pour connaître l'étendue de ces effets négatifs.

En conclusion, cette étude révèle un réel verdissement du nord vraisemblablement lié au changement climatique, un cycle normal d'incendie et de régénération dans la forêt boréale et un verdissement possible lié à un changement de la distribution des âges des forêts dans la zone faisant l'objet d'une exploitation commerciale. Un verdissement est également observé dans les territoires agricoles et urbains établis et doit faire l'objet d'études plus poussées.

# INDICE DES HABITATS DYNAMIQUES (IHD) MOYEN DE 2000 À 2006

L'indice des habitats dynamiques (IHD) canadien est une image composite de trois indicateurs de la dynamique de la végétation. Il s'agit d'un indice de télédétection relativement nouveau fondé sur un ensemble de données commençant en 2000, dont les utilisations potentielles sont toujours en cours d'essai et de perfectionnement. L'IHD présenté ici n'est actuellement qu'une mesure ponctuelle; les tendances ne sont pas encore établies.

Les trois indicateurs qui composent l'IHD canadien sont : 1) la verdure annuelle cumulative; 2) la fPAR minimale annuelle; 3) la variation saisonnière de la verdure (Coops *et al.*, 2008). Ces trois indicateurs sont dérivés d'estimations de la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif qui est absorbé par la surface terrestre (fPAR), obtenue au moyen des capteurs MODIS lancés en 1999 et 2001 (Heinsch *et al.*, 2006). La fPAR varie entre 0 et 1. Les valeurs les plus élevées, moyennées sur l'ensemble de la saison de croissance, correspondent aux paysages productifs de dense végétation, tandis que les valeurs les plus faibles, aussi moyennées sur l'ensemble de la saison de croissance, correspondent aux paysages moins productifs (Coops *et al.*, 2008). La fPAR des régions couvertes de neige approche 0, mais les zones d'ombre et l'absorption par la chlorophylle des conifères contribuent quand même à une valeur de fPAR positive.

Même si la fPAR est semblable à l'IVDN, l'estimation de la fPAR est plus directement reliée à la physiologie des plantes que celle de l'IVDN, puisqu'elle est calculée à partir d'un modèle fondé sur la physique de la propagation de la lumière dans le feuillage (Coops *et al.*, 2008). En outre, la fPAR n'est pas soumise comme l'IVDN aux mêmes problèmes associés à la saturation à des valeurs plus élevées (Coops *et al.*, 2009b) (voir Vérifications de la qualité et limites, à la page 20). Les estimations de la fPAR utilisent un certain nombre de bandes spectrales du capteur MODIS (jusqu'à sept), tandis que l'IVDN est basé sur deux bandes spectrales, soit la rouge et l'infrarouge proche (voir IVDN, à la page 17).

L'IHD a été élaboré en Australie (Mackey *et al.*, 2004), et il a été adapté à une utilisation canadienne par Coops *et al.* (2008), dont les résultats forment la base de la présente section et ont été résumés par écozone<sup>+</sup> aux fins du RETE.

## Méthodes

Coops *et al.* (2008) ont obtenu des estimations des valeurs maximales mensuelles de la fPAR à une résolution de 1 km à partir des données recueillies par les capteurs MODIS des satellites Terra et Aqua du système d'observation de la Terre de la NASA, de 2000 à 2005. Ces données sont calibrées par la NASA de manière à tenir compte de l'angle du soleil, de la réflectance de fond et de l'angle de visualisation, et sont accessibles au public. Les valeurs maximales mensuelles de la fPAR sont utilisées pour réduire au minimum l'incidence des nuages, de la

couverture de neige, de la variation atmosphérique et d'autres conditions environnementales confondantes. À partir de ces valeurs, Coops *et al.* (2008) ont calculé les trois composantes de l'IHD pour chaque année :

1. **La fPAR annuelle cumulative** : la fPAR annuelle intégrée, fondée sur les valeurs mensuelles maximales de la fPAR pour l'année. On interprète cette valeur comme étant la verdure annuelle cumulative.
2. **La fPAR minimale annuelle** : la valeur la moins élevée parmi les valeurs mensuelles maximales de la fPAR pour l'année. On interprète cette valeur comme représentant le couvert annuel minimal de végétation verte. Toutefois, cette interprétation n'est pas exacte en hiver en raison des effets des ombres; c'est pourquoi nous évitons de l'utiliser.
3. **Le coefficient annuel de variation de la fPAR** : l'écart-type des valeurs mensuelles maximales de la fPAR pour l'année, divisé par la moyenne des valeurs mensuelles maximales de la fPAR pour l'année. On interprète cette valeur comme étant le degré annuel de saisonnalité de la végétation.

Coops *et al.* ont ensuite calculé une moyenne à partir de l'ensemble de données sur six ans pour chacune des trois composantes, puis ont produit une carte pour chaque composante ainsi qu'une carte composite (Coops *et al.*, 2008). Leurs résultats sont analysés ci-après, par écozone<sup>+</sup>. Comme les données représentent une moyenne sur six ans, elles ne fournissent à l'heure actuelle qu'une estimation de la situation dans chaque écozone<sup>+</sup>, sans information sur les tendances.

## Vérifications de la qualité et limites

L'algorithme du capteur MODIS a été considérablement perfectionné depuis ses débuts (Yang *et al.*, 2006a), mais très peu d'activités de validation des estimations de la fPAR ont été effectuées (Yang *et al.*, 2006b).

Nous avons constaté une petite ligne bien distincte le long du 60<sup>e</sup> parallèle dans la composante de la couverture annuelle minimale, qui pourrait être associée à un changement de l'algorithme à cette latitude. Cette ligne ne change pas notre interprétation, puisque la composante est très faible à cette latitude.

## Résultats

Les trois composantes de l'IHD sont montrées séparément aux figures 11a à 11c. La dynamique de la végétation est résumée par composante et par écozone<sup>+</sup> au tableau 2.

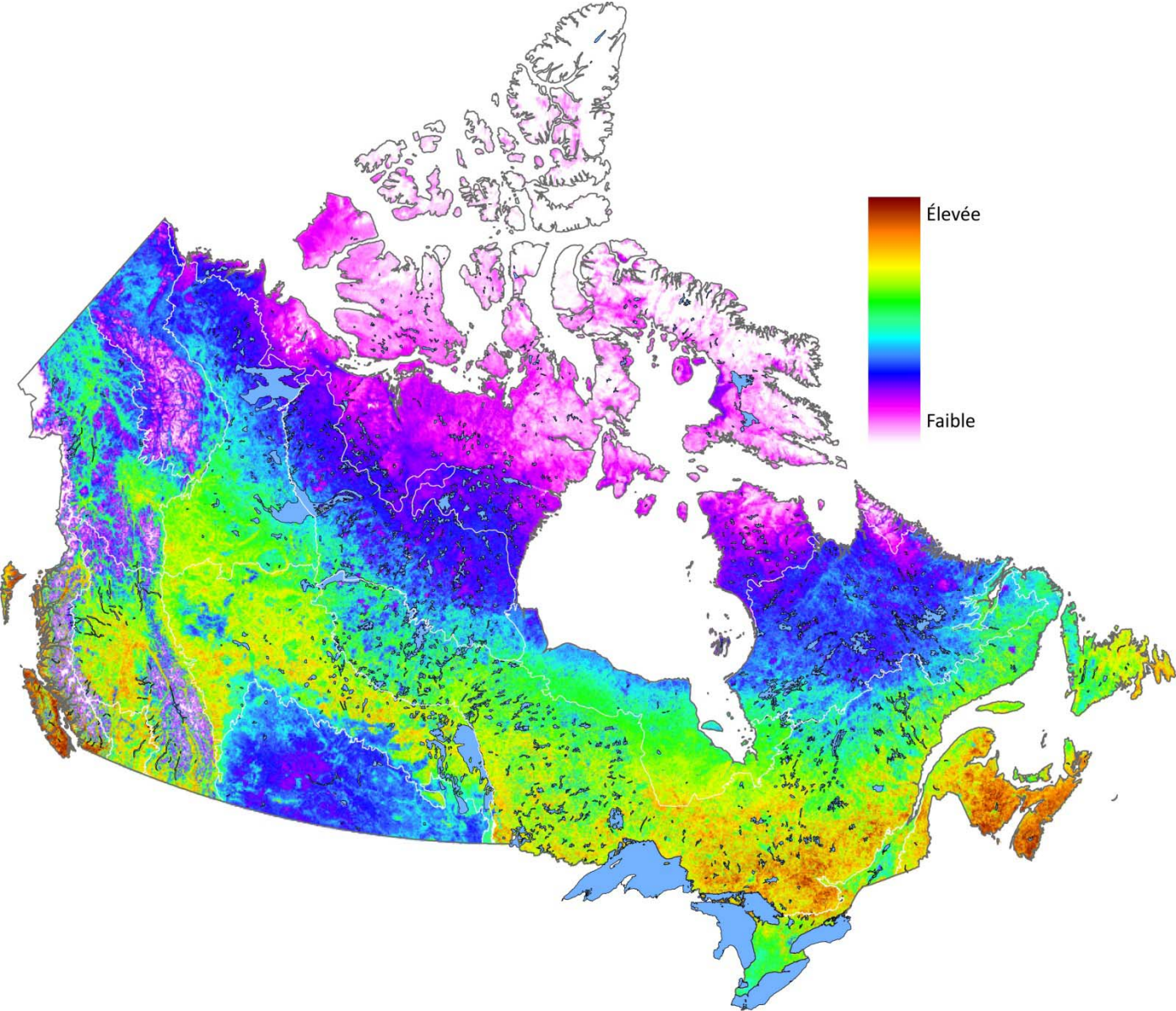
Du point de vue de la verdure annuelle cumulative moyenne à l'échelle nationale (figure 11a), on constate que les forêts constituent les régions les plus productives du Canada, et que la verdure la plus marquée se situe dans les climats maritimes méridionaux (du côté de l'Atlantique comme du Pacifique; la verdure diminue à mesure qu'on monte vers la limite des arbres). L'effet de l'altitude dans les montagnes les plus hautes du pays est visible, tout comme celui de l'aridité dans la région des Prairies.

La configuration nationale de la fPAR minimale annuelle moyenne (figure 11b) est semblable à celle de la verdure cumulative moyenne, mais elle est fortement compressée vers le sud. Autrement dit, la couverture minimale est très faible dans l'ensemble du pays, sauf dans le sud et dans les zones de basse altitude. Les valeurs les plus élevées de la fPAR minimale moyenne sont situées dans une bande de dense forêt mixte, dans l'est du Canada. La fPAR est relativement élevée dans cette région, même en hiver, en raison des ombres projetées par les arbres et de l'absorption par la chlorophylle des conifères.

La variation saisonnière moyenne de la verdure (figure 11c) affiche un profil différent de celui des deux autres composantes de l'IHD. Parmi les écarts les plus marqués, on constate qu'il n'y a pas de différence entre la région des Prairies et les forêts. La variation saisonnière augmente vers le nord et dans les zones d'altitude plus élevée du sud. Cette augmentation résulte d'une fPAR moyenne moins élevée dans ces régions, plutôt que d'une augmentation de l'écart-type. Cette composante affiche certaines variations subtiles et inattendues à l'intérieur des écozones<sup>+</sup>, décrites brièvement au tableau 2. Quand on inspecte la composante de près, on constate qu'elle est très sensible aux variations relativement faibles de l'altitude.

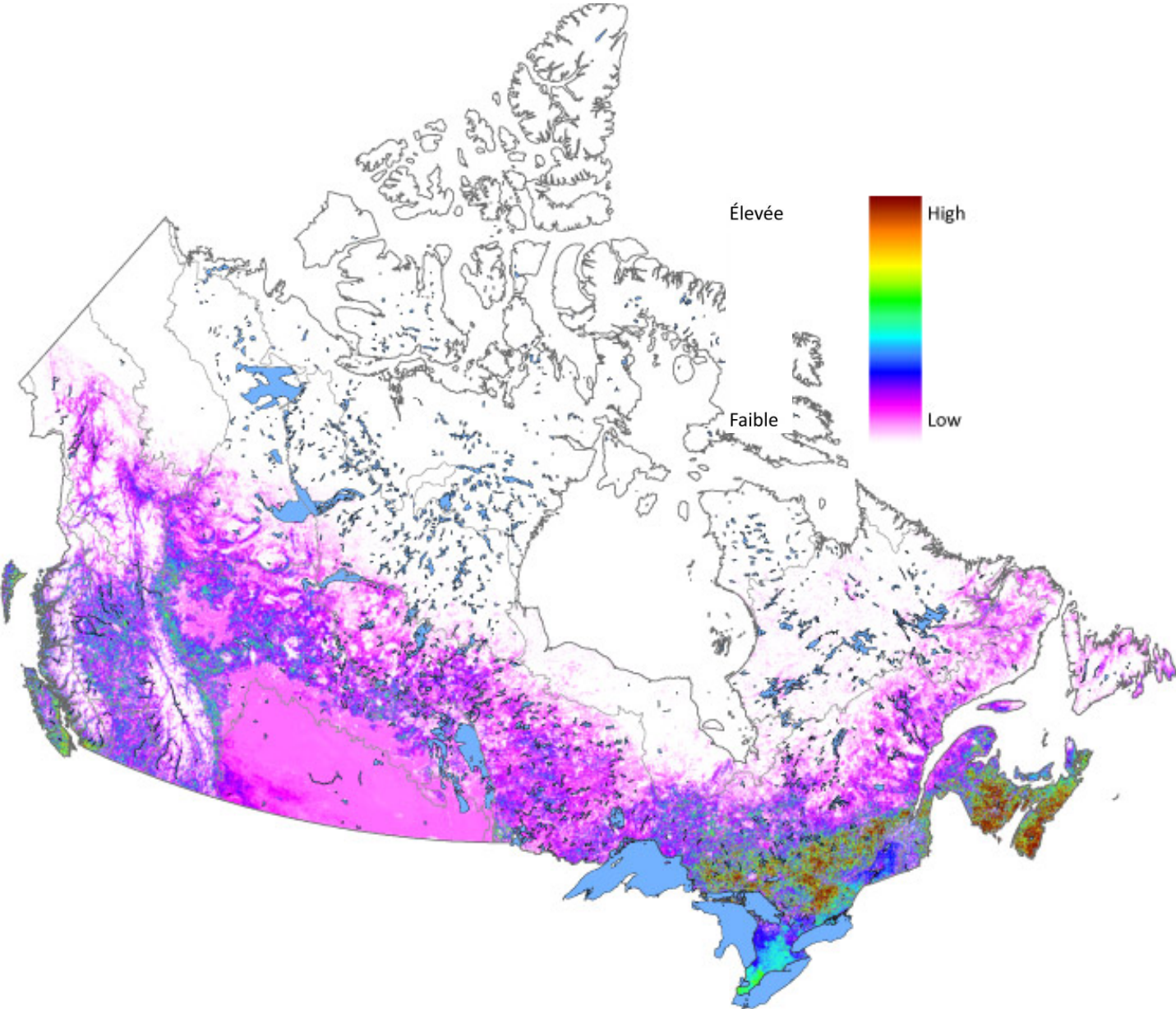
En examinant chaque année de 2000 à 2005, Coops *et al.* (2008) ont aussi constaté que les écozones<sup>+</sup> des plaines boréales, des plaines à forêts mixtes et des plaines hudsoniennes (au moyen du Cadre écologique national (Groupe de travail sur la stratification écologique, 1995)) présentaient les plus grandes variations de l'IHD.

a. Verdure annuelle cumulative (moyenne de 2000 à 2005)





b. fPAR minimale annuelle (moyenne de 2000 à 2005)



c. Variation saisonnière de la verdure (moyenne de 2000 à 2005)

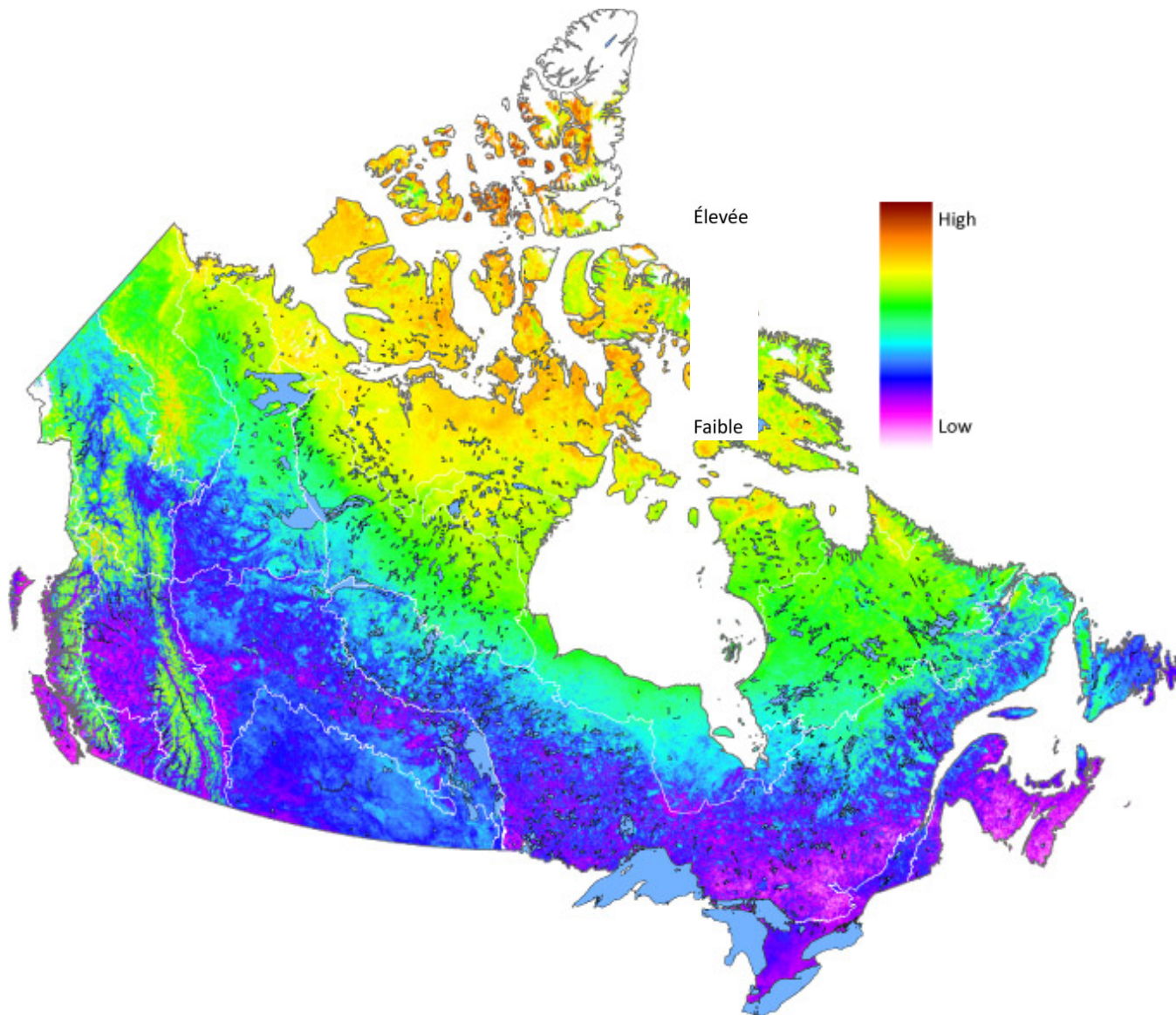


Figure 11. Dynamique de la végétation dans les écozones<sup>+</sup> du Canada par composante de l'indice des habitats dynamiques (moyenne de 2000 à 2005). Les composantes de l'IHD sont : a) la verdure annuelle cumulative; b) la fPAR minimale annuelle; c) le degré de saisonnalité de la végétation. Source : image adaptée de Coops et al. (2008)

Tableau 2. Caractéristiques de la dynamique de la végétation, par écozone<sup>+</sup> (moyenne de 2000 à 2005)

Écozone <sup>+</sup>	Verdure annuelle cumulative	fPAR minimale annuelle	Degré annuel de saisonnalité de la végétation
Écozone <sup>+</sup> de l'Arctique	Variable : très faible dans la Cordillère arctique, plus élevée dans l'ouest de l'île Banks, dans la grande plaine de Koukdjuak sur l'île de Baffin et dans la région d'Ungava	Très faible	Élevé, mais légèrement plus bas dans certaines régions, comme celle d'Ungava
Écozone <sup>+</sup> de la taïga des plaines	Faible à moyenne : diminution du sud au nord	Très faible à faible	Diminue vers le sud : quelques zones intéressantes au Québec et au Labrador, surtout autour du ruisseau Hamilton
Écozone <sup>+</sup> de la taïga du Bouclier	Variable : élevée au sud, faible au nord; effets de l'altitude évidents	Faible, mais augmente vers le sud	Élevé dans le nord; devient moyen dans le sud; effets de l'altitude évidents
Écozone <sup>+</sup> des plaines hudsoniennes	Élevée au sud; devient moyenne le long du littoral de la baie d'Hudson	Faible dans l'ensemble	Dégradé d'élevé à faible entre le nord et le sud
Écozone <sup>+</sup> du Bouclier boréal	Élevée au sud; devient plus faible vers le nord, particulièrement dans le nord-ouest, où les incendies sont fréquents	Variable : très faible dans le nord à très élevée dans le sud	Dégradé d'élevé à faible entre le nord et le sud; plus faible à l'extrémité sud du Bouclier canadien, dans l'est de l'Ontario
Écozone <sup>+</sup> maritime de l'Atlantique	Élevée à très élevée dans le sud du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse	Variable : faible à Gaspé et dans le nord du cap Breton à très élevée dans le sud du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse	Élevé, mais plus faible dans le nord du Cap-Breton et dans certaines parties de Gaspé
Écozone <sup>+</sup> des plaines à forêts mixtes	Faible dans les zones urbaines, moyenne dans les zones agricoles et élevée dans les zones forestières	Variable : plus élevée dans le sud-ouest de l'Ontario et dans l'île Manitoulin; plus faible dans le sud de la baie Georgienne et au nord du lac Simcoe	Faible dans l'ensemble
Écozone <sup>+</sup> des plaines boréales	Variable; plus faible dans les zones agricoles	Variable : faible dans les zones agricoles; plus faibles dans des parcelles qui pourraient être des zones brûlées	Variable : plus faible dans les zones agricoles et dans des parcelles qui pourraient être des zones brûlées
Écozone <sup>+</sup> des Prairies	Moyenne à faible : plus élevée dans la zone forestière de Cypress Hills	Faible de manière uniforme	Moyen dans l'ensemble
Écozone <sup>+</sup> de la taïga de la Cordillère	Variable : très faible dans les montagnes; plus élevée dans le nord du Yukon	Faible	Varie avec l'altitude

Écozone <sup>+</sup>	Verdure annuelle cumulative	fPAR minimale annuelle	Degré annuel de saisonnalité de la végétation
Écozone <sup>+</sup> de la Cordillère boréale	Variable : très faible à proximité des sommets de montagne; plus élevée dans le nord de la C.-B.	Faible; plus élevée dans les vallées	Effet de l'altitude très prononcé : élevé dans les zones de haute altitude et faible dans les vallées
Écozone <sup>+</sup> maritime du Pacifique	Variable : très faible sur le sommet des montagnes à très élevée dans les régions côtières des îles de Vancouver et de la Reine-Charlotte	Très faible sur le sommet des montagnes à très élevée dans les régions côtières des îles de Vancouver et de la Reine-Charlotte	Effet de l'altitude très prononcé : élevé dans les zones de haute altitude et faible dans les vallées
Écozone <sup>+</sup> de la Cordillère montagnarde	Élevée, sauf à haute altitude et dans les vallées asséchées	Variable	Faible, mais élevé à haute altitude
Écozone <sup>+</sup> du bassin intérieur de l'Ouest	Élevée, sauf dans les vallées intérieures asséchées	Variable	Faible, mais élevé à haute altitude
Écozone <sup>+</sup> de la forêt boréale de Terre-Neuve	Élevée dans l'est et moyenne à élevée dans l'ouest	Faible, sauf dans la bande côtière	Effet de l'altitude prononcé

## Analyse

Chacune des trois composantes de l'IHD fournit de l'information sur la production de la végétation, et les valeurs de la fPAR intègrent les effets de divers facteurs sur la productivité. Les forêts principalement composées d'arbres à feuillage persistant, par exemple, présenteront une fPAR cumulative annuelle plus élevée, une fPAR minimale annuelle plus élevée et un degré de saisonnalité plus faible que les forêts principalement composées d'arbres à feuilles caduques. La productivité (et donc la fPAR) tend à augmenter avec la température, mais elle est réduite dans les périodes de sécheresse.

L'IHD offre une approche potentielle pour l'utilisation de produits d'observation de la Terre normalisés aux fins de la surveillance à long terme de la productivité de la végétation (depuis 2000). Les utilisations spécifiques de cet ensemble de données relativement récent sont toujours en cours d'approfondissement et d'essai. L'un des principaux champs de recherche consiste à utiliser l'IHD pour prévoir les tendances de la biodiversité. Cette recherche est fondée sur l'hypothèse voulant que la répartition et l'abondance des espèces dans le paysage soient régies par certains paramètres environnementaux clés (Turner *et al.*, 2003), dont la productivité de la végétation (MacArthur, 1972). Coops *et al.* (2008) mentionnent que les mesures directes de la fPAR, qui sont incluses dans les trois composantes de l'IHD, fournissent de meilleures estimations de la productivité de la végétation que l'IVDN, plus souvent utilisé. Il serait intéressant de comparer des indicateurs de la productivité similaires fondés sur les données de l'IVDN pour mieux comprendre ces méthodes.

Andrew *et al.* (2011) ont examiné la capacité des composantes de l'IHD à expliquer les tendances associées à la composition des communautés de papillons et à l'affinité des espèces au Canada. Ils ont constaté que ces composantes en elles-mêmes ne constituaient pas de bons indicateurs, mais ils ont émis l'hypothèse qu'elles pourraient être utilisées pour améliorer les prévisions de la composition des communautés à l'intérieur des écozones et des écorégions du Canada, qui sont définies sur le plan qualitatif (Groupe de travail sur la stratification écologique, 1995). Coops *et al.* (2009a) ont utilisé les composantes de l'IHD pour prévoir la richesse en espèces des oiseaux nicheurs aux États-Unis et, avec la couverture terrestre et la topographie, en Ontario (Coops *et al.*, 2009c). Leurs résultats ont été plus prometteurs. La capacité de prévoir la répartition des espèces et les paramètres pertinents pour la prévision de la répartition des espèces varient selon l'espèce. Dans bien des cas, ce type d'analyse permet surtout de prévoir la répartition potentielle des espèces, et non la répartition réelle (Kerr et Ostrovsky, 2003).

L'utilisation de données de télédétection pour décrire indirectement les grandes tendances de la biodiversité pourrait servir à élaborer un « système d'alerte rapide » associé aux changements à grande échelle de la biodiversité (Duro *et al.*, 2007). L'utilité des composantes de l'IHD dans ce type de travaux reste à prouver, et d'autres utilisations potentielles pourraient être élaborées.

## **INDICATEURS DE FRAGMENTATION – DENSITÉ FORESTIÈRE ET DENSITÉ DE LISIÈRES FORESTIÈRES**

Pour permettre la réalisation d'une analyse pertinente sur les changements survenus dans le paysage au fil du temps, il convient de discuter des changements observés dans la superficie totale des diverses classes de couverture terrestre (voir la première section du présent rapport, à partir de la page 3), en conjonction avec les changements enregistrés dans le profil de la couverture terrestre (comme l'homogénéité). Cette analyse s'inscrit dans le thème de la fragmentation. Depuis les années 1970, la fragmentation de l'habitat joue un rôle important dans la recherche portant sur la conservation (Haila, 2002; Manning *et al.*, 2004). Une définition généralement reconnue de la fragmentation (ou du processus de fragmentation) est la division d'un habitat contigu en parcelles de plus petite taille (Fleishman et Mac Nally, 2007). La fragmentation entraîne une diminution de la connectivité de l'habitat, une augmentation de la densité de sa lisière et une augmentation de l'isolation des parcelles restantes. Les analyses des répercussions de la fragmentation sont complexes du fait que les différentes composantes de la fragmentation sont souvent confondues (Haila, 2002; Lee *et al.*, 2002; Manning *et al.*, 2004), et les résultats varient fortement selon les espèces (Flaspohler *et al.*, 2001; Ries et Sisk, 2004; Villard *et al.*, 2007).

L'achèvement, vers 2000, d'une carte à haute résolution (30 m) de la région forestière du Canada par le Service canadien des forêts (SCF) dans le cadre de l'initiative conjointe Observation de la Terre pour le développement durable des forêts (OTDD) a fourni un ensemble de données détaillées sur la couverture forestière canadienne. Cet ensemble a permis au SCF, en

collaboration avec l'UBC, de calculer des statistiques spatiales sur la couverture forestière canadienne à un certain nombre de résolutions (Wulder *et al.*, 2008b). Parmi les statistiques relatives à la fragmentation publiées par Wulder *et al.* (2008b), deux sont présentées ici par écozone<sup>+</sup> aux fins du RETE : 1) proportion de pixels forestiers à l'intérieur d'une unité d'analyse de 1 km<sup>2</sup> (c.-à-d. la densité forestière); 2) longueur de toutes les lisières entre les pixels forestiers et les pixels non forestiers à l'intérieur de chaque unité d'analyse de 1 km<sup>2</sup> (c.-à-d. la densité de lisières forestières).

Ces analyses doivent être considérées comme des produits de fragmentation généraux de premier niveau. Étant donné que cette analyse est valide pour une période unique, il en résulte principalement une description des profils forestiers au sein de chaque écozone<sup>+</sup>.

## Méthodes

Les cartes de couverture terrestre de l'initiative OTDD ont été produites à partir de données Landsat, à une résolution de 30 m, recueillies de mai à octobre entre 1999 et 2002 (90 % des données ont été obtenues à moins d'une année de la date cible de 2000) (Wulder *et al.*, 2008a). Chaque pixel a été classé dans l'une de 23 catégories. Le lecteur trouvera une analyse plus poussée du processus de classification dans Wulder *et al.* (2008a).

Une méthode détaillée est décrite dans Wulder *et al.* (2008b). Dans le présent document, les mesures de la « proportion de la superficie forestière » (appelée « densité forestière » dans le présent rapport) et de la « densité de lisières forestières » sont résumées par écozone<sup>+</sup>. Les régions classées comme étant « boisées » dans l'ensemble de données de l'OTDD (> 10 % de couverture forestière (Wulder et Nelson, 2003)) ont été reclassées en tant que « forêts », et toutes les autres régions ont été reclassées en tant que couvertures « autres que des forêts » aux fins de ces analyses (Wulder *et al.*, 2008a). La densité forestière représente la proportion de pixels forestiers (résolution de 30 m) se trouvant à l'intérieur de chaque unité d'analyse de 1 km<sup>2</sup>, tandis que la densité de lisières forestières représente la longueur totale de toutes les lisières entre les pixels forestiers et les pixels non forestiers à l'intérieur d'une unité d'analyse de 1 km<sup>2</sup>.

## Vérifications de la qualité et limites

Les données antérieures sont souvent utilisées pour la validation de produits de télédétection (p. ex. la base de données SILC a permis de valider les cartes des changements observés dans la couverture terrestre qui sont brièvement décrites dans la première section du présent rapport, à la page iii) (Wulder *et al.*, 2007). Le produit de l'OTDD dont ont été tirés les calculs de la densité forestière et de la densité de lisières a été validé à l'aide de données vidéo recueillies par aéronef expressément aux fins du processus de validation du produit en question. Un sous-échantillon de 31 000 km<sup>2</sup> du produit de l'OTDD a été analysé sur l'île de Vancouver, dans l'écozone<sup>+</sup> maritime du Pacifique (Wulder *et al.*, 2007), au moyen d'une approche axée sur l'échantillonnage aléatoire systématique et stratifié décrit dans Wulder *et al.* (2006). La précision de la classification a été établie à 86 % pour la catégorie des forêts de conifères (une sous-classe des « forêts »), qui représente 71 % du territoire échantillonné.

On constate que l'on peut discerner visuellement la présence d'une ligne à la frontière entre l'Ontario et le Québec dans la carte de la densité de lisières forestières (figure 13). Bien que cette ligne ne soit pas large d'un point de vue numérique, elle introduit un élément de prudence dans l'interprétation; il faut davantage se fier aux différences mises en relief dans une seule province plutôt qu'entre les provinces. Cette ligne pourrait aussi être le reflet d'une différence entre les politiques de gestion forestière des deux provinces.

Dans l'interprétation des résultats suivants, il importe de noter que ces mesures ne concernent pas l'activité humaine, mais plutôt les caractéristiques du paysage qui peuvent résulter de processus naturels ou anthropiques. Par exemple, dans les milieux humides ou les régions alpines, la densité de lisières forestières sera relativement élevée en raison de l'hétérogénéité naturelle du paysage et non en raison des activités humaines (Wulder *et al.*, 2008b).

## Résultats

Les résultats de l'analyse de la densité forestière sont présentés à la figure 12, et ceux de l'analyse de la densité de lisières le sont à la figure 13. Ces résultats sont analysés ci-après, par écozone<sup>+</sup>.



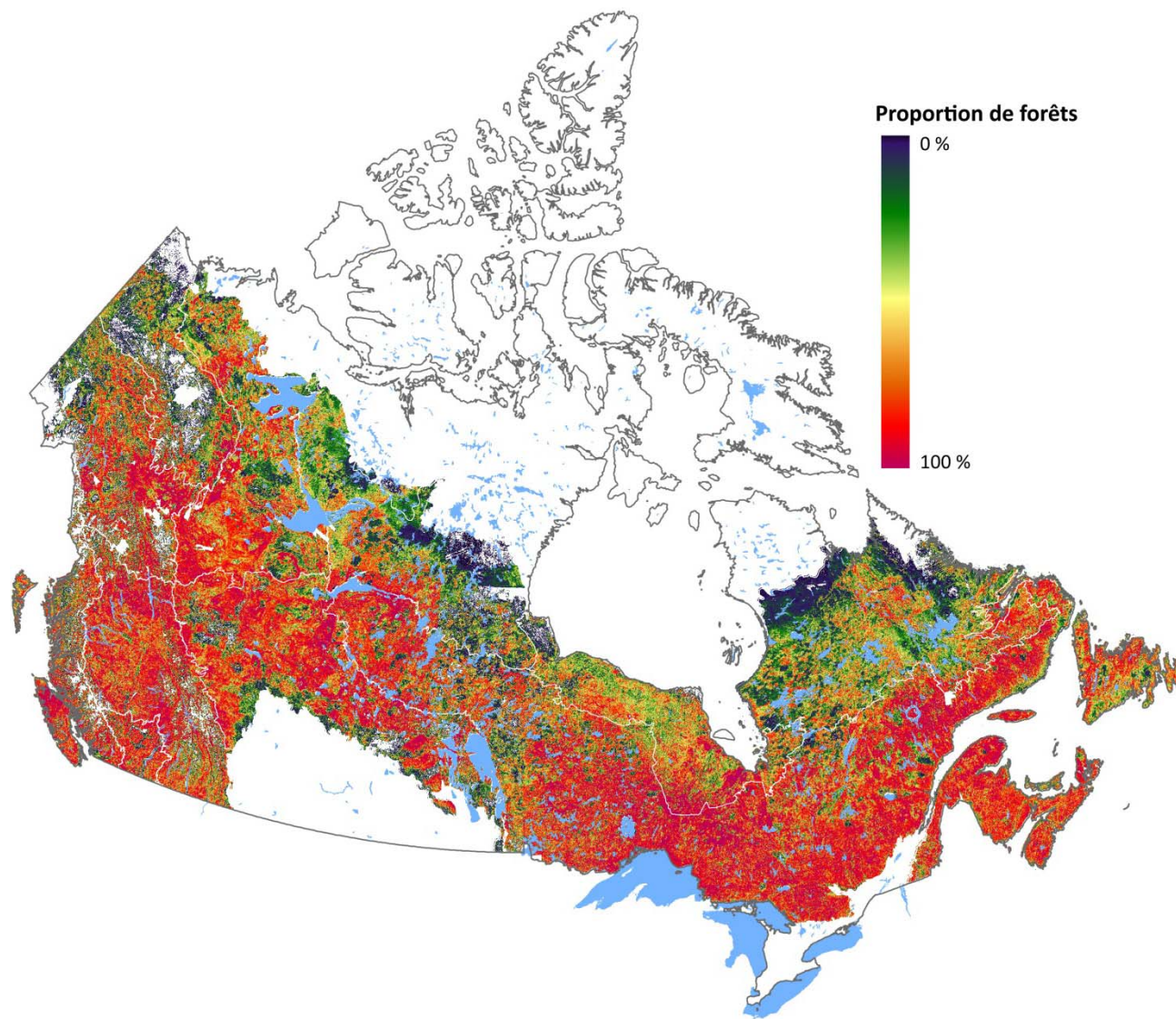


Figure 12. Densité des forêts dans la région forestière du Canada, vers 2000.  
La densité des forêts est calculée comme étant la proportion de pixels forestiers de 30 m<sup>2</sup> dans chaque unité d'analyse de 1 km<sup>2</sup>.  
Source : carte dérivée du produit de classification OTDD de la couverture terrestre de 2000, créé par le SCF (Wulder et al., 2008b).



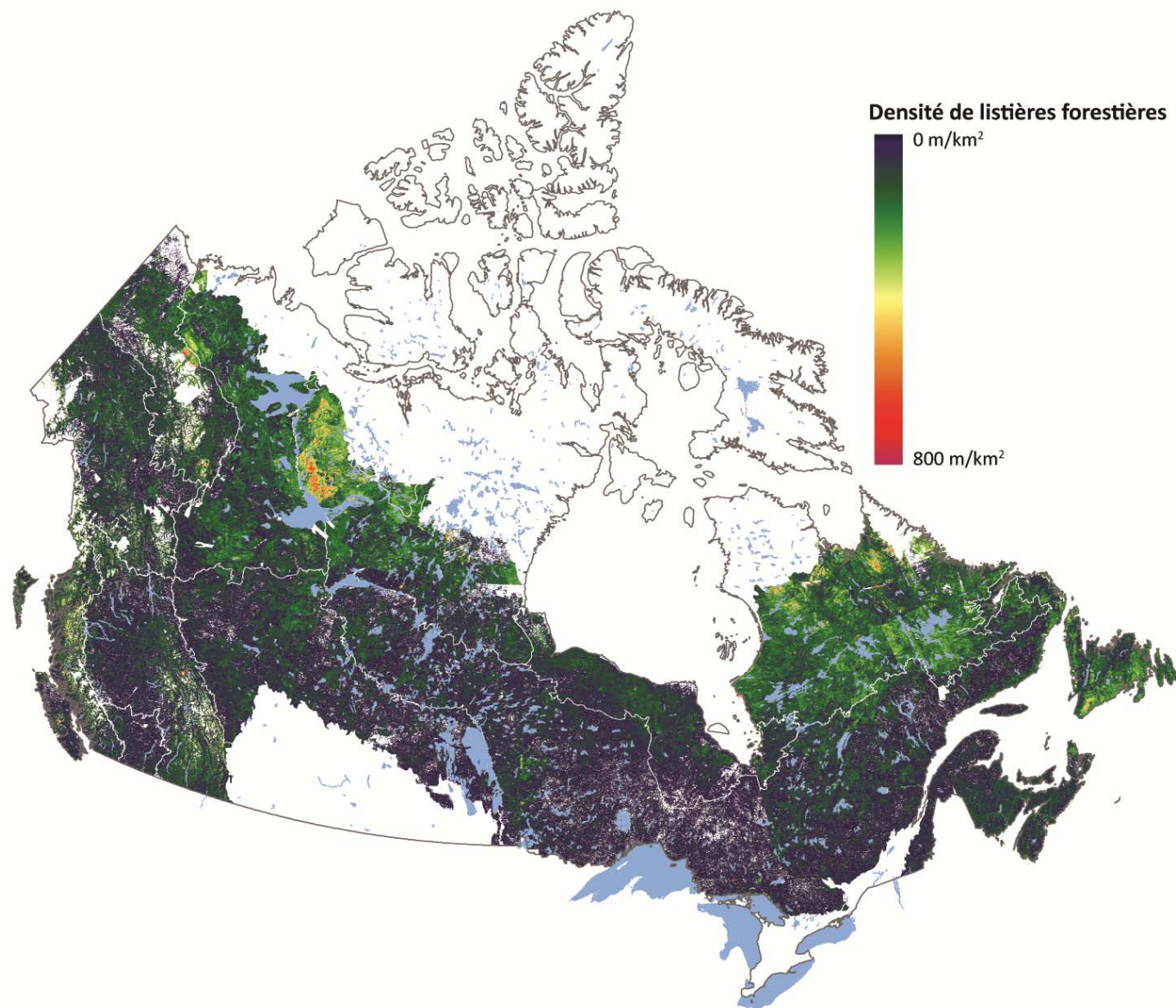


Figure 13. Densité de lisières forestières dans la région forestière du Canada, vers 2000.  
 La densité de lisières forestières est calculée comme étant la longueur totale de toutes les lisières entre les pixels forestiers (résolution de 30 m) et les pixels non forestiers à l'intérieur d'une unité d'analyse de 1 km<sup>2</sup>.  
 Source : carte dérivée du produit de classification OTDD de la couverture terrestre de 2000, créé par le SCF (Wulder et al., 2008b).

## ***Écozone<sup>+</sup> de la taïga des plaines***

On constate une importante variation dans la latitude, l'altitude et le climat dans l'écozone<sup>+</sup> de la taïga des plaines. Il s'agit d'une région qui est souvent touchée par de grands feux de friches et, par conséquent, la végétation se compose d'une mosaïque de zones brûlées à différents stades de régénération. La densité forestière dans une grande partie de cette écozone<sup>+</sup> est supérieure à 50 % (figure 12). Des densités forestières moindres ont été observées immédiatement au sud du Grand lac des Esclaves, dans les hautes terres près de Norman Wells, dans une vaste zone brûlée à l'ouest du lac La Martre et dans certaines des parties inférieures de la vallée du Mackenzie (figure 12). La densité de lisières forestières dans l'écozone<sup>+</sup> de la taïga des plaines est supérieure à celle enregistrée dans les forêts situées plus au sud, avec une valeur s'établissant habituellement à 250 m/km<sup>2</sup> et atteignant de 500 à 600 m/km<sup>2</sup> dans la zone de toundra qui entoure les contreforts des monts Mackenzie (figure 13).

## ***Écozone<sup>+</sup> de la taïga du Bouclier***

La partie ouest de l'écozone<sup>+</sup> de la taïga du Bouclier est composée d'environ deux tiers de forêt et un tiers de toundra. La majorité de la superficie boisée dans cette écozone<sup>+</sup> présente une densité forestière supérieure à 50 %, tandis que les zones de toundra et les zones brûlées affichent des densités forestières de 30 % ou moins (figure 12). La densité de lisières forestières dans la partie ouest de l'écozone<sup>+</sup> s'établissait habituellement aux environs de 250 m/km<sup>2</sup> (figure 13). Une vaste zone située immédiatement au nord du Grand lac des Esclaves affichait des densités de lisières pouvant atteindre 650 m/km<sup>2</sup>. Cette zone correspond vraisemblablement à une région de transition entre la couverture terrestre boisée et celle qui est constituée de toundra.

La partie est de l'écozone<sup>+</sup> est composée d'environ un tiers de forêt et deux tiers de toundra. Comme dans l'ouest, la partie boisée inclut de nombreuses zones brûlées. La densité forestière est supérieure à 50 % sur la majorité de la superficie boisée dans la partie est de l'écozone<sup>+</sup>, tandis qu'une densité forestière se rapprochant davantage de 30 % ou moins a été mesurée dans les zones de toundra et les zones brûlées (figure 12). Contrairement à la partie ouest, la densité forestière a diminué à moins de 10 % à l'extrémité nord de cette écozone<sup>+</sup>, ce qui donne à penser que la partie est de l'écozone<sup>+</sup> affiche des conditions de croissance plus difficiles que la partie ouest. Comme dans l'ouest, les valeurs habituelles de la densité de lisières forestières s'établissaient aux environs de 250 m/km<sup>2</sup>, avec quelques petites zones situées à l'extrémité nord de cette écozone<sup>+</sup> affichant des densités de lisières pouvant atteindre 650 m/km<sup>2</sup> (figure 13). Celles-ci peuvent être associées à des zones mal drainées et à une densité plus élevée des milieux humides.

## ***Écozone<sup>+</sup> du Bouclier boréal***

La forêt est la couverture terrestre dominante dans l'écozone<sup>+</sup> du Bouclier boréal, où de nombreuses zones brûlées de divers âges peuvent être observées. Un grand nombre de zones de densité forestière moindre correspondent à des zones brûlées plus récentes (figure 12). La densité de lisières forestières, bien que faible dans l'ensemble de cette écozone<sup>+</sup> (de 0 à environ 150 m/km<sup>2</sup>), est légèrement plus élevée dans le nord, en particulier dans les régions les plus touchées par les feux de friches (figure 13). Il convient de noter dans cette écozone<sup>+</sup> un vaste territoire affichant une faible densité forestière et une densité de lisières forestières élevée dans les environs des fonderies de nickel de Sudbury.

## ***Écozone<sup>+</sup> maritime de l'Atlantique***

L'écozone<sup>+</sup> maritime de l'Atlantique est relativement petite, et sa couverture terrestre est surtout composée de forêts mixtes. Les terres agricoles ont remplacé la forêt dans une grande partie de l'Île-du-Prince-Édouard, la vallée de l'Annapolis en Nouvelle-Écosse et la vallée de Saint-Jean au Nouveau-Brunswick. Une densité forestière élevée a été mesurée sur la plus grande partie de cette zone (figure 12). Il convient de noter l'existence d'une zone de faible densité forestière enregistrée dans la région du parc national du Canada des Hautes-Terres-du-Cap-Breton. Cette faible densité peut résulter du fait que l'on a laissé en place des forêts à l'intérieur du parc afin que celles-ci puissent se régénérer naturellement après les graves infestations de tordeuse des bourgeons de l'épinette des années 1970 et du début des années 1980, alors que les forêts situées à l'extérieur du parc ont fait l'objet d'une coupe de récupération. Cette hypothèse n'a toutefois pas été confirmée.

La densité de lisières forestières dans l'écozone<sup>+</sup> maritime de l'Atlantique est faible (figure 13), oscillant entre 0 et 150 m/km<sup>2</sup> environ dans une grande partie de la région. La densité de lisières s'est accrue pour atteindre 270 m/km<sup>2</sup> environ dans les hautes terres du nord du Cap-Breton.

## ***Écozone<sup>+</sup> des plaines boréales***

Un territoire considérable, dans l'écozone<sup>+</sup> des plaines boréales, a été converti à l'agriculture, comme l'indique la densité forestière moindre enregistrée en périphérie de l'écozone<sup>+</sup> des Prairies et dans la région de la rivière de la Paix où se trouvent les villes de Dawson Creek, de Grand Prairie, de Peace River et de Valleyview (figure 12). Un très important feu de friches, qui a brûlé une superficie d'environ 2 000 km<sup>2</sup> au nord de Whitecourt, en 1998, a donné naissance à une zone de faible densité forestière. Les zones caractérisées par une altitude élevée et un terrain irrégulier, y compris les hautes terres du parc national du Canada du Mont-Riding, le parc provincial du mont Duck, les collines Porcupine et les collines Pasquia, affichent une densité forestière élevée.

La densité de lisières forestières va en général de 0 à 150 m/km<sup>2</sup> environ, certaines zones atteignant 250 m/km<sup>2</sup> (figure 13). Une comparaison visuelle avec la carte originale de la

couverture terrestre de l'initiative OTDD (avant la simplification de la classification entre les « forêts » et les couvertures « autres que des forêts ») montre que la densité de lisières forestières dans les forêts homogènes non exploitées s'établit d'ordinaire en deçà de 100 m/km<sup>2</sup>, tandis que les zones de forêt contenant de nombreux blocs de coupe affichent des densités de lisières forestières variant de 100 à 200 m/km<sup>2</sup>. Dans de nombreuses zones non exploitées, les lisières naturelles, comme celles qui longent les plans d'eau et les milieux humides, affichent des densités oscillant entre 100 et 200 m/km<sup>2</sup>.

### ***Écozone<sup>+</sup> de la taïga de la Cordillère***

La couverture terrestre dominante de l'écozone<sup>+</sup> de la taïga de la Cordillère est composée d'arbustes aux altitudes plus basses et de toundra sur les monts Mackenzie, dans la chaîne Stikine et dans la partie canadienne de la chaîne de Brooks. Une vaste partie de cette écozone<sup>+</sup> affiche une densité forestière allant de très faible à faible (figure 12) en raison de la présence de vastes hautes terres virtuellement dépourvues d'arbres. À des altitudes plus basses, la plupart des zones contiennent des forêts éparées et ouvertes au lieu de forêts continues à densité élevée. Une zone significative affichant une densité forestière relativement élevée a toutefois été découverte dans les basses terres entre les monts Mackenzie et la chaîne de Brooks. La densité de lisières forestières est d'ordinaire faible dans l'ensemble de l'écozone<sup>+</sup> (figure 13; de 0 à 150 m/km<sup>2</sup> environ). Certains secteurs, toutefois, affichent des densités de lisières de près de 300 m/km<sup>2</sup>, en particulier dans les basses terres situées à l'ouest de Fort Good Hope.

### ***Écozone<sup>+</sup> de la Cordillère boréale***

La classification des zones de végétation de l'écozone<sup>+</sup> de la Cordillère boréale est fortement déterminée par l'altitude; la couverture terrestre va des forêts denses de conifères dans les vallées aux arbustes, aux arbres rabougris et à la toundra pour finalement se composer de neige et de glace sur les sommets. La densité forestière est relativement hétérogène (figure 12), mais d'ordinaire corrélée avec le gradient d'altitude, les densités forestières les plus élevées étant observées aux altitudes les plus basses. La densité de lisières forestières, qui oscille entre 0 et 250 m/km<sup>2</sup> environ, est représentative des autres régions de la forêt boréale (figure 13).

### ***Écozone<sup>+</sup> maritime du Pacifique***

La classification des zones de végétation de l'écozone<sup>+</sup> maritime du Pacifique est fortement déterminée par l'altitude. La densité forestière est très élevée dans l'archipel des îles de la Reine-Charlotte, sur l'île de Vancouver et aux altitudes plus basses le long de la côte du Pacifique (figure 12). La densité de lisières forestières s'accroît avec l'altitude et peut atteindre des valeurs de 650 m/km<sup>2</sup> à la limite de la zone arborée. Cette densité de lisières élevée peut également être imputable à la géométrie des montagnes mêmes; la présence de plusieurs chenaux d'écoulement à l'intérieur d'une seule unité d'analyse de 1 km x 1 km se traduirait par des densités de lisières forestières élevées.

## ***Écozones<sup>+</sup> de la Cordillère montagnarde et du bassin intérieur de l'Ouest***

Les écozones<sup>+</sup> de la Cordillère montagnarde et du bassin intérieur de l'Ouest sont pratiquement impossibles à distinguer si l'on se fonde sur la densité forestière et la densité de lisières forestières; ces deux régions sont brièvement décrites ensemble ci-après. Les conditions de croissance pour les forêts sont idéales dans ces écozones<sup>+</sup>, sauf dans les vallées intérieures asséchées de l'écozone<sup>+</sup> du bassin intérieur de l'Ouest. La densité forestière est fortement biaisée en faveur des classes à densité élevée dans les deux écozones<sup>+</sup>, et un plus grand nombre d'unités d'analyse affichent une très faible densité forestière dans le bassin intérieur de l'Ouest (figure 12) en raison de la présence de forêts ouvertes dans les vallées intérieures asséchées. En 2000, la zone d'arbres morts des suites d'une infestation du dendroctone du pin ponderosa n'était pas encore visible dans ces mesures du paysage. Les régions les plus au nord de l'écozone<sup>+</sup> de la Cordillère montagnarde contiennent de vastes zones affichant une densité forestière très élevée, probablement attribuable à l'absence d'activités d'exploitation.

Dans ces écozones<sup>+</sup>, la densité des lisières forestières était inversement corrélée avec la densité forestière, les zones de densité forestière plus faible affichant d'ordinaire une densité de lisières forestières plus élevée (figure 13), probablement en raison de la fragmentation provoquée par l'exploitation forestière industrielle dont ces deux écozones<sup>+</sup> ont fait l'objet.

## ***Écozone<sup>+</sup> des plaines hudsoniennes***

La végétation de l'écozone<sup>+</sup> des plaines hudsoniennes est dominée par une forêt de conifères ceinturée par des arbustales et des milieux humides qui couvrent une bande de sols mal drainés vers la partie sud de l'écozone<sup>+</sup>. Elle est caractérisée par une prédominance de la végétation de toundra dans le parc national du Canada Wapusk jusqu'au nord de York Factory. La densité forestière est faible dans une grande partie de l'écozone<sup>+</sup> des plaines hudsoniennes (figure 12) en raison de la présence de nombreux petits plans d'eau libre et de milieux humides non boisés. La densité de lisières forestières reflète également la nature variable du paysage (figure 13), une grande partie de l'écozone<sup>+</sup> affichant des densités de lisières forestières de l'ordre de 250 m/km<sup>2</sup>.

## ***Écozone<sup>+</sup> de la forêt boréale de Terre-Neuve***

Dans la plus grande partie de l'écozone<sup>+</sup> de la forêt boréale de Terre-Neuve, la densité forestière est supérieure à 50 % (figure 12). Deux grandes zones de faible densité forestière, enregistrées à l'est de Corner Brook et de Deer Lake, sur le plateau de Buchans, semblent être d'anciennes zones brûlées. Une vaste zone de faible densité forestière centrée sur la réserve faunique Bay du Nord semble aussi être une ancienne zone brûlée.

La densité de lisières forestières dans cette écozone<sup>+</sup> est relativement élevée (figure 13), c'est-à-dire qu'elle est supérieure à 350 m/km<sup>2</sup> sur la plus grande partie de la superficie classée comme arbustaie et supérieure à 600 m/km<sup>2</sup> environ sur les monts Long Range. Ces mesures semblent indiquer l'existence d'une mosaïque de forêts et d'arbustales très hétérogène, caractérisée par de nombreuses lisières.

## Analyse

Comme l'ensemble de données de l'OTDD n'est actuellement disponible que pour la période de l'année 2000, les principaux résultats de la présente analyse sont descriptifs. L'image de la densité forestière à pleine résolution montre de nombreuses zones de faible densité, plus particulièrement de petites parcelles visées par l'exploitation forestière et de grandes parcelles touchées par des incendies. L'exploitation forestière d'envergure industrielle semble également accroître la densité de lisières, qui varie de moins de 100 m/km<sup>2</sup> dans les zones de forêts matures homogènes non exploitées à une fourchette de 100 à 200 m/km<sup>2</sup> dans les zones morcelées par de nombreux blocs de coupe. De plus, la densité des lisières forestières est plus élevée dans la partie nord de l'écozone<sup>+</sup> du Bouclier boréal, où la forêt devient moins continue et plus vulnérable aux grands incendies.

L'utilité de cet ensemble de données se limite actuellement à la description des caractéristiques ponctuelles des forêts. Une série chronologique produite tous les dix ans, par exemple, permettrait de surveiller les tendances des zones forestières.

## CONCLUSION

Dans la présente étude, des données de télédétection à basse et moyenne résolution ont été utilisées pour évaluer l'état et les tendances de la biodiversité dans les écosystèmes du Canada. Les trois analyses dont l'objectif consistait à examiner l'évolution des tendances montrent certains des changements du paysage canadien survenus au cours des trente dernières années, dont une augmentation nette de la superficie des zones brûlées de 1985 à 2005, et indiquent une intensification de l'agriculture, particulièrement dans l'écozone<sup>+</sup> des plaines boréales (cette information devrait être corroborée par des données recueillies à plus petite échelle). Il est particulièrement saisissant de constater que la productivité primaire a considérablement augmenté ( $p < 0,05$ ) dans 22 % de la masse terrestre du Canada entre 1985 et 2006, tandis qu'elle n'a diminué de manière significative que dans 0,5 % de cette masse terrestre.

Les données sur l'état des écosystèmes ont été analysées par écozone<sup>+</sup> au moyen de deux ensembles de données plus récents, soit l'ensemble de données de la fPAR provenant du capteur MODIS, utilisé pour produire l'IHD, et l'ensemble de données de l'OTDD dérivé de données Landsat montrant l'état des forêts et la densité des lisières forestières dans la région forestière du Canada. L'utilité de ces mesures de l'état des écosystèmes dans la surveillance future des écosystèmes reste à prouver.

Il importe de reconnaître que les experts de la télédétection, qui compilent et analysent les données, ne sont généralement pas des experts de l'écologie. D'autre part, les experts de l'écologie qui interprètent les résultats et les mettent en contexte ne sont habituellement pas des experts de la télédétection. Il est donc très important que ces deux groupes travaillent en étroite collaboration, de manière à ce que la plupart des questions relatives à la biodiversité puissent être posées et résolues au moyen de données de télédétection, en toute connaissance des limites du domaine. Il existe un grand éventail d'utilisateurs de données de télédétection, et un ensemble de données peut être utilisé à plusieurs fins et analysé de différentes façons. À mesure que nous continuons d'utiliser les données de télédétection aux fins de la surveillance écologique, il importe que les groupes d'utilisateurs et les fournisseurs de données communiquent entre eux. Ainsi, les données produites seront utiles pour tous, et les bonnes questions pourront être posées et résolues en vue d'atteindre les objectifs de surveillance.

## RÉFÉRENCES

- Alcaraz-Segura, D., Chuvieco, E., Epstein, H.E., Kasischke, E.S. et Trishchenko, A. 2010. Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: differences between satellite datasets. *Global Change Biology* 16:760-770.
- Andrew, M.E., Wulder, M.A. et Coops, N.C. 2011. How do butterflies define ecosystems? A comparison of ecological regionalization schemes. *Biological Conservation* 144:1409-1418.
- Arft, A.M., Walker, M.D., Turner, P.L., Gurevitch, J., Alatalo, J.M., Molau, U., Nordenhäll, U., Stenström, A., Stenström, M., Bret-Harte, M.S., Dale, M., Diemer, M., Gugerli, F. et Henry, G.H.R. 1999. Responses of tundra plants to experimental warming: meta-analysis of the International Tundra Experiment. *Ecological Monographs* 69:491-511.
- Bonsal, B. et Regier, M. 2007. Historical comparison of the 2001/2002 drought in the Canadian prairies. *Climate Research* 33:229-242.
- Bunn, A.G. et Goetz, S.J. 2006. Trends in satellite-observed circumpolar photosynthetic activity from 1982 to 2003: the influence of seasonality, cover type, and vegetation density. *Earth Interactions* 10:1-19.
- Centre canadien de télédétection. 2005. Glossary of remote sensing terms [en ligne]. Ressources naturelles Canada. [http://ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/index\\_e.php?id=486](http://ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/index_e.php?id=486) (consulté le 29 mars 2010).
- Cheng, R. et Lee, P. 2008. Urban sprawl and other major land use conversions in Ontario's greenbelt from 1993 to 2007: a change analysis project using satellite imagery. *Global Forest Watch Canada*. Edmonton, AB. 31 p.
- Cihlar, J., Beaubien, J., Latifovic, R. et Simard, G. 1999. Canada couverture des terres, 1995. Version 1.1. Ressources naturelles Canada. Ottawa, Ontario. CD-Rom.
- Cihlar, J., Xiao, Q., Chen, J., Beaubien, J., Fung, K. et Latifovic, R. 1998. Classification by progressive generalization: a new automated methodology for remote sensing multi-channel data. *International Journal of Remote Sensing* 19:2685-2704.
- Coops, N.C., Waring, R.H., Wulder, M.A., Pidgeon, A.M. et Radeloff, V.C. 2009a. Bird diversity: a predictable function of satellite-derived estimates of seasonal variation in canopy light absorbance across the United States. *Journal of Biogeography* 36:905-918.
- Coops, N.C., Wulder, M.A., Duro, D.C., Han, T. et Berry, S. 2008. The development of a Canadian dynamic habitat index using multi-temporal satellite estimates of canopy light absorbance. *Ecological Indicators* 8:754-766.
- Coops, N.C., Wulder, M.A. et Iwanicka, D. 2009b. Demonstration of a satellite-based index to monitor habitat at continental-scales. *Ecological Indicators* 9:948-958.



- Coops, N.C., Wulder, M.A. et Iwanicka, D. 2009c. Exploring the relative importance of satellite-derived descriptors of production, topography and land cover for predicting breeding bird species richness over Ontario, Canada. *Remote Sensing of Environment* 113:668-679.
- Duro, D.C., Coops, N.C., Wulder, M.A. et Han, T. 2007. Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing. *Progress in Physical Geography* 31:235-260.
- Environnement Canada. 2005. Narrative descriptions of terrestrial ecozones and ecoregions of Canada [en ligne]. Environnement Canada. [http://www.ec.gc.ca/soer-ree/English/framework/NarDesc/canada\\_e.cfm](http://www.ec.gc.ca/soer-ree/English/framework/NarDesc/canada_e.cfm) (consulté le 15 mai 2008).
- Flannigan, M., Logan, K., Amiro, B., Skinner, W. et Stocks, B. 2005. Future area burned in Canada. *Climatic Change* 72:1-16.
- Flannigan, M.D. et Wotton, B.M. 2001. Climate, weather and area burned. *Dans Forest fires: behaviour and ecological effects*. Johnson, E.A. et Miyanishi, K. (éd.). Academic Press. San Diego, CA. pp. 335-357.
- Flaspohler, D.J., Temple, S.A. et Rosenfield, R.N. 2001. Species-specific edge effects on nest success and breeding bird density in a forested landscape. *Ecological Applications* 11:32-46.
- Fleishman, E. et Mac Nally, R. 2007. Measuring the response of animals to contemporary drivers of fragmentation. *Revue canadienne de zoologie* 85:1080-1090.
- Fondation David Suzuki et Ontario Nature. 2011. Biodiversity in Ontario's Greenbelt. Toronto, ON et Vancouver, BC. 51 p.
- Gilabert, M.A., Gandia, S. et Melia, J. 1996. Analyses of spectral biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing of Environment* 55:11-20.
- Gillett, N.P., Weaver, A.J., Zwiers, F.W. et Flannigan, M.D. 2004. Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. *Geophysical Research Letters* 31:1-4. doi:10.1029/2004GL020876.
- Girardin, M.P. 2007. Interannual to decadal changes in area burned in Canada from 1781 to 1982 and the relationship to Northern Hemisphere land temperatures. *Global Ecology and Biogeography* 16:557-566. doi:10.1111/j.1466-8238.2007.00321.x.
- Goetz, S., Bunn, A.G., Fiske, G.J., Houghton, R.A. et Woodwell, G.M. 2005. Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102:13521-13525.
- Government of Ontario. 2005. *Greenbelt Act, 2005*. Legislative Assembly of the Province of Ontario. Assented to February 24, 2005. Last amendment: 2009, c. 12, Sched. L, s. 5.
- Groupe de travail sur la stratification écologique. 1995. Cadre écologique national pour le Canada. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction générale de la recherche, Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques et Environnement Canada,

- Direction générale de l'état de l'environnement, Direction de l'analyse des écozones. Ottawa, ON/Hull, QC. 144 p. Rapport et carte nationale 1/7 500 000.
- Gurin, D. 2003. Understanding sprawl. A citizen's guide. Fondation David Suzuki. Vancouver, BC. iv + 22 p.
- Haila, Y. 2002. A conceptual genealogy of fragmentation research: from island biogeography to landscape ecology. *Ecological Applications* 12:321-334.
- Hebda, R.J., Gustavson, K., Golinski, K. et Calder, A.M. 2000. Burns bog ecosystem review synthesis report for Burns Bog, Fraser River Delta, south-western British Columbia, Canada. British Columbia Environmental Assessment Office. Victoria, BC.
- Heinsch, F.A., Zhao, M.S., Running, S.W., Kimball, J.S., Nemani, R.R., Davis, K.J., Bolstad, P.V., Cook, B.D., Desai, A.R., Ricciuto, D.M., Law, B.E., Oechel, W.C., Kwon, H., Luo, H.Y., Wofsy, S.C., Dunn, A.L., Munger, J.W., Baldocchi, D.D., Xu, L.K., Hollinger, D.Y., Richardson, A.D., Stoy, P.C., Siqueira, M.B.S., Monson, R.K., Burns, S.P. et Flanagan, L.B. 2006. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44:1908-1925.
- Hollister, R.D., Webber, P.J. et Tweedie, C.E. 2005. The response of Alaskan Arctic tundra to experimental warming: differences between short- and long-term responses. *Global Change Biology* 11:525-536.
- Huete, A.R. et Jackson, R.D. 1987. Suitability of spectral indexes for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands. *Remote Sensing of Environment* 23:213-&.
- Huete, A.R. et Jackson, R.D. 1988. Soil and atmosphere influences on the spectra of partial canopies. *Remote Sensing of Environment* 25:89-105.
- Javorek, S.K. et Grant, M.C. 2011. Tendances de la capacité d'habitat faunique des terres agricoles du Canada, de 1986 à 2006. Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010, Rapport technique thématique n° 14. Conseils canadiens des ministres des ressources. Ottawa, ON. vi + 51 p.  
<http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=137E1147-1>.
- Kawabata, A., Ichii, K. et Yamaguchi, Y. 2001. Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing* 22:1377-1382.
- Kerr, J.T. et Ostrovsky, M. 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution* 18:299-305.
- Krezek-Hanes, C.C., Ahern, F., Cantin, A. et Flannigan, M.D. 2011. Tendances des grands incendies de forêts au Canada, de 1959 à 2007. Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010, Rapport technique thématique n° 6. Conseils canadiens des ministres des ressources. Ottawa, ON. vi + 56 p.  
<http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=137E1147-1>.

- Latifovic, R. et Pouliot, D. 2005. Multitemporal land cover mapping for Canada: methodology and products. *Journal canadien de télédétection* 31:347-363.
- Latifovic, R., Trischenko, A.P., Chen, J., Park, W.B., Khlopenkov, K.V., Fernandes, R., Pouliot, D., Ungureanu, C., Lou, Y., Wang, S., Davidson, A. et Cihlar, J. 2005. Generating historical AVHRR 1 km baseline satellite data records over Canada suitable for climate change studies. *Journal canadien de télédétection* 31:324-346.
- Lee, M., Fahrig, L., Freemark, K. et Currie, D.J. 2002. Importance of patch scale vs landscape scale on selected forest birds. *Oikos* 96:110-118.
- Los, S.O., Collatz, G.J., Sellers, P.J., Malmstrom, C.M., Pollack, N.H., DeFries, R.S., Bounoua, L., Parris, M.T., Tucker, C.J. et Dazlich, D.A. 2000. A global 9-yr biophysical land surface dataset from NOAA AVHRR data. *Journal of Hydrometeorology* 1:183-199.
- MacArthur, R.H. 1972. *Geographical ecology: patterns in the distribution of species*. Harper & Row. Princeton, NJ. xviii + 269 p.
- Mackey, B.G., Bryan, J. et Randall, L. 2004. *Australia's Dynamic Habitat Template 2003*. MODIS Vegetation Workshop II. University of Montana. Missoula.
- Manning, A.D., Lindenmayer, D.B. et Nix, H.A. 2004. Continua and Umwelt: novel perspectives on viewing landscapes. *Oikos* 104:621-628.
- McKinney, M.L. 2002. Urbanization, biodiversity, and conservation. *Bioscience* 52:883-890.
- Ministère des Affaires municipales et du Logement. 2005. *Plan de la ceinture de verdure*. Ministère des Affaires municipales et du Logement. 62 p.
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G. et Nemani, R.R. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386:698-702.
- Myneni, R.B., Tucker, C.J., Asrar, G. et Keeling, C.D. 1998. Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 103:6145-6160.
- Olthof, I. et Pouliot, D. 2010. Treeline vegetation composition and change in Canada's western Subarctic from AVHRR and canopy reflectance modeling. *Remote Sensing of Environment* 114:805-815.
- Olthof, I., Pouliot, D., Latifovic, R. et Chen, W.J. 2008. Recent (1986-2006) vegetation-specific NDVI trends in northern Canada from satellite data. *Arctic* 61:381-394.
- Parisien, M.A., Peters, V.S., Wang, Y., Little, J.M., Bosch, E.M. et Stocks, B.J. 2006. Spatial patterns of forest fires in Canada, 1980-1999. *International Journal of Wildland Fire* 15:361-374.
- Podur, J., Martell, D.L. et Knight, K. 2002. Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada. *Canadian Journal of Forest Research/Revue canadienne de recherche forestière* 32:195-205.

- Pouliot, D., Latifovic, R. et Olthof, I. 2009. Trends in vegetation NDVI from 1 km AVHRR data over Canada for the period 1985-2006. *International Journal of Remote Sensing* 30:149-168.
- Ries, L. et Sisk, T.D. 2004. A predictive model of edge effects. *Ecology* 85:2917-2926.
- Santin-Janin, H., Garel, M., Chapuis, J.-L. et Pontier, D. 2009. Assessing the performance of NDVI as a proxy for plant biomass using non-linear models: a case study on the Kerguelen Archipelago. *Polar Biology* 32:861-871.
- Secrétariat du RETE. 2011. Sommaire des éléments probants relativement aux constatations clés pour l'écozone<sup>+</sup> de la Cordillère boréale. Biodiversité canadienne: état et tendances des écosystèmes en 2010, Rapport sommaire des éléments probants relativement aux constatations clés n° 5. Conseils canadiens des ministres des ressources. Ottawa, (Ont). Sous presse.
- Skinner, W.R., Shabbar, A., Flannigan, M.D. et Logan, K. 2006. Large forest fires in Canada and the relationship to global sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research* 111. doi:10.1029/2005JD006738.
- Slayback, D.A., Pinzon, J.E., Los, S.O. et Tucker, C.J. 2003. Northern Hemisphere photosynthetic trends 1982-99. *Global Change Biology* 9:1-15.
- Société canadienne d'hypothèques et de logement. 2005. Rapport sur la croissance intelligente au Canada. Gouvernement du Canada. 8 p.
- Statistique Canada. 2012. Recensement de 2006 : Portrait de la population canadienne en 2006 : Dynamique de la population infraprovinciale [en ligne]. <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2006/as-sa/97-550/p14-fra.cfm> (consulté en 2010).
- Sturm, M., Racine, C. et Tape, K. 2001. Climate change: increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature* 411:546-547.
- Tape, K., Sturm, M. et Racine, C. 2006. The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-arctic. *Global Change Biology* 12:686-702.
- Tateishi, R. et Ebata, M. 2004. Analysis of phenological change patterns using 1982-2000 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data. *International Journal of Remote Sensing* 25:2287-2300.
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E. et Steininger, M. 2003. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution* 18:306-314.
- Villard, M.A., Schmiegelow, F.K.A. et Trzcinsk, M.K. 2007. Short-term response of forest birds to experimental clearcut edges. *Auk* 124:828-840.
- Walker, M.D., Wahren, C.H., Hollister, R.D., Henry, G.H.R., Ahlquist, L.E., Alatalo, J.M., Bret-Harte, M.S., Calef, M.P., Callaghan, T.V., Carroll, A.B., Epstein, H.E., Jónsdóttir, I.S., Klein, J.A., Magnússon, B., Molau, U., Oberbauer, S.F., Rewa, S.P., Robinson, C.H., Shaver, G.R.,

- Suding, K.N., Thompson, C.C., Tolvanen, A., Totland, O., Turner, P.L., Tweedie, C.E., Webber, P.J. et Wookey, P.A. 2006. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *Dans* Proceedings of the National Academy of Sciences. National Academy of Sciences. Washington, DC. Vol. 103, pp. 1342-1346.
- Wilson, S.J. 2008. Ontario's wealth, Canada's future: appreciating the value of the greenbelt's eco-services. Fondation David Suzuki. Vancouver, BC. 70 p.
- Wulder, M. et Nelson, T. 2003. EOSD land cover classification legend report: version 2. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique. Victoria, BC. 81 p.
- Wulder, M.A., Franklin, S.E., White, J.C., Linke, J. et Magnussen, S. 2006. An accuracy assessment framework for large-area land cover classification products derived from medium-resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 27:663-683.
- Wulder, M.A., White, J.C., Cranny, M.M., Hall, R.J., Luther, E., Beaudoin, A., Goodenough, D.G. et Dechka, J.A. 2008a. Monitoring Canada's forests. Part 1: completion of the EOSD land cover project. *Journal canadien de télédétection* 34:563-584.
- Wulder, M.A., White, J.C., Han, T., Coops, N.C., Cardille, J.A., Holland, T. et Grills, D. 2008b. Monitoring Canada's forests. Part 2: national forest fragmentation and pattern. *Journal canadien de télédétection* 34:563-584.
- Wulder, M.A., White, J.C., Magnussen, S. et McDonald, S. 2007. Validation of a large area land cover product using purpose-acquired airborne video. *Remote Sensing of Environment* 106:480-491.
- Yang, W.Z., Huang, D., Tan, B., Stroeve, J.C., Shabanov, N.V., Knyazikhin, Y., Nemani, R.R. et Myneni, R.B. 2006a. Analysis of leaf area index and fraction of PAR absorbed by vegetation products from the terra MODIS sensor: 2000-2005. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44:1829-1842.
- Yang, W.Z., Tan, B., Huang, D., Rautiainen, M., Shabanov, N.V., Wang, Y., Privette, J.L., Huemmrich, K.F., Fensholt, R., Sandholt, I., Weiss, M., Ahl, D.E., Gower, S.T., Nemani, R.R., Knyazikhin, Y. et Myneni, R.B. 2006b. MODIS leaf area index products: from validation to algorithm improvement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44:1885-1898.
- Zhang, X., Brown, R., Vincent, L., Skinner, W., Feng, Y. et Mekis, E. 2011. Tendances climatiques au Canada, de 1950 à 2007. Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010, Rapport technique thématique n° 5. Conseils canadiens des ministres des ressources. Ottawa, ON. iv + 22 p. <http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=137E1147-1>.
- Zhou, L., Tucker, C.J., Kaufmann, R.K., Slayback, D., Shabanov, N.V. et Myneni, R.B. 2001. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 106:20,069-20,083.

# ANNEXE I

*Système de classification de la couverture terrestre utilisé pour l'analyse des changements survenus dans la couverture terrestre publiée dans le RETE*

Classe	Description
Forêts	Densité du couvert forestier > 10 %. Inclut : <ul style="list-style-type: none"> <li>– forêt de conifères (&gt; 80 % de résineux);</li> <li>– forêt de feuillus (&gt; 80 % d'arbres feuillus);</li> <li>– forêt mixte (entre 20 et 80 % des essences sont soit des feuillus, soit des résineux).</li> </ul>
Arbustaires	Densité du couvert forestier < 10 %, couvert arbustif > 40 %. <i>Nota : la plupart des milieux humides sont inclus dans cette catégorie.</i>
Prairies	Couvert forestier ou arbustif < 10 %, présence de végétation herbacée.
Terres agricoles	Inclut : <ul style="list-style-type: none"> <li>– terres cultivées (terres couvertes en général de cultures herbacées annuelles, peuvent contenir &lt; 10 % d'arbustes ou d'arbres; cette catégorie inclut les cultures à biomasse faible, moyenne et élevée);</li> <li>– terres cultivées/zones boisées (contient une combinaison de terres cultivées, de forêts, d'arbustaires, de prairies ou de zones bâties, aucune composante ne représentant &gt; 70 % [surface] du paysage).</li> </ul>
Faible végétation et terres dénudées	Inclut les zones comprenant des lichens, des éricacées, des plantes herbacées, des arbustes (< 40 % de la végétation doit être composée d'arbustes; dans le cas contraire, la zone sera classée en tant qu'« arbustaire »), des sols nus ou des affleurements rocheux.
Zone brûlée	Inclut : <ul style="list-style-type: none"> <li>– les nouvelles perturbations (zones brûlées &lt; 5 ans);</li> <li>– les anciennes perturbations (zones brûlées &gt; 5 ans, mais pas encore classées en tant qu'autre type de végétation).</li> </ul> <p><i>Nota : bien que les anciennes et les nouvelles zones brûlées représentent la majorité de cette classe, les zones de récolte, d'exploitation minière et de défoliation grave imputable aux insectes peuvent également être incluses.</i></p>
Territoire urbain	Territoire couvert par des immeubles et d'autres structures artificielles. Dans le cas des petites zones urbaines, cette classe peut être confondue avec d'autres classes de territoire sans végétation. <i>Nota : le territoire urbain, dans le présent rapport, est déterminé d'après les données de 1996-1997 de l'Atlas du Canada. La résolution des données AVHRR est trop faible pour permettre la cartographie des changements survenus dans le territoire urbain au fil du temps.</i>

Neige/glace/glacier	<p>Territoire couvert par de la glace ou de la neige de façon permanente.</p> <p><i>Nota : il existe des erreurs dans cette classe pour les écozones<sup>+</sup> maritime du Pacifique et de la Cordillère boréale. Ces erreurs ont été corrigées dans la carte de la couverture terrestre de 2005, mais ne le sont pas dans les matrices de transition. En conséquence, les changements survenus dans cette classe au fil du temps ne peuvent être analysés.</i></p>
Eaux continentales	<p>Territoire couvert par de l'eau sous forme liquide.</p> <p><i>Nota : les données sur l'étendue de la classe des « eaux continentales » sont issues de l'Atlas du Canada. Les changements survenus dans les eaux continentales ne sont pas cartographiés en raison de la nature dynamique et de la grande variabilité de cette classe.</i></p>

## ANNEXE II

Couverture terrestre en 2005 et changements dans la couverture terrestre entre 1985 et 2005, par écozone<sup>+</sup>.

### Écozone<sup>+</sup> de l'Arctique

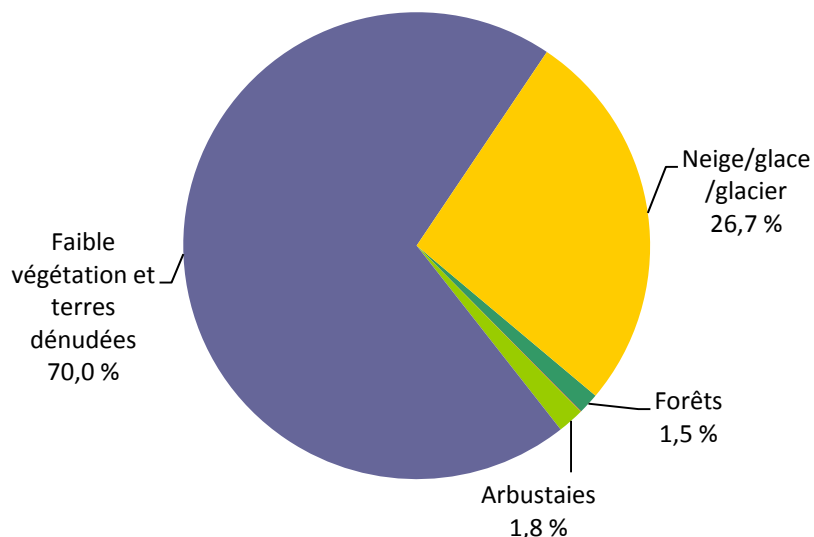


Figure 14. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de l'Arctique en 2005.

La superficie des zones brûlées est très faible (< 0,001 %). La superficie totale du territoire se chiffre à 2 355 196 km<sup>2</sup>.

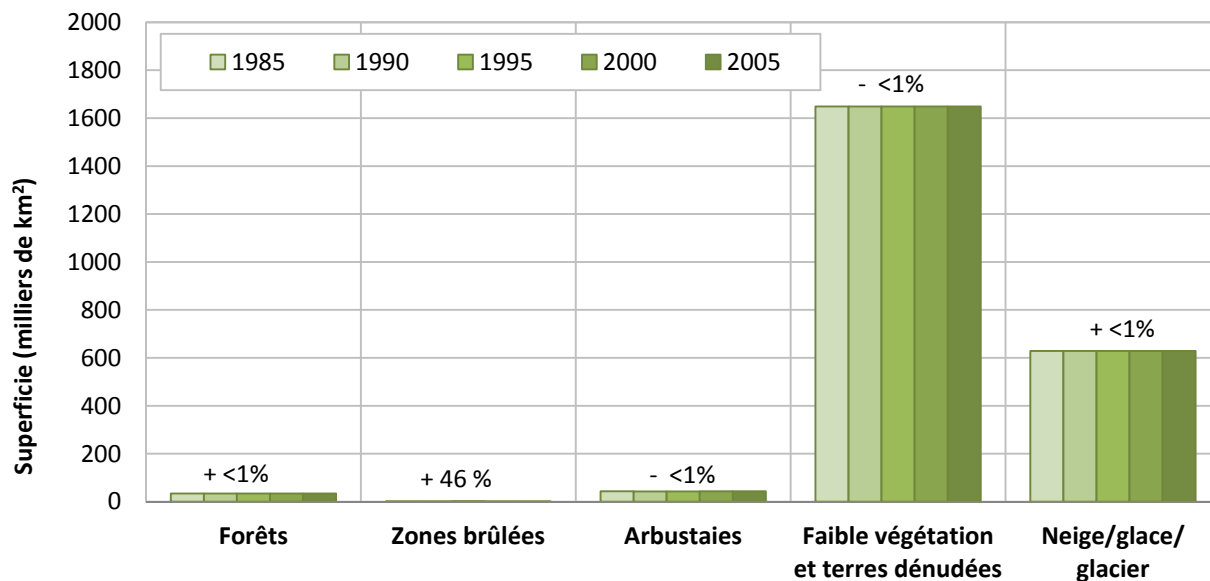


Figure 15. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de l'Arctique, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005.

Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.



## Écozone<sup>+</sup> de la taïga des plaines

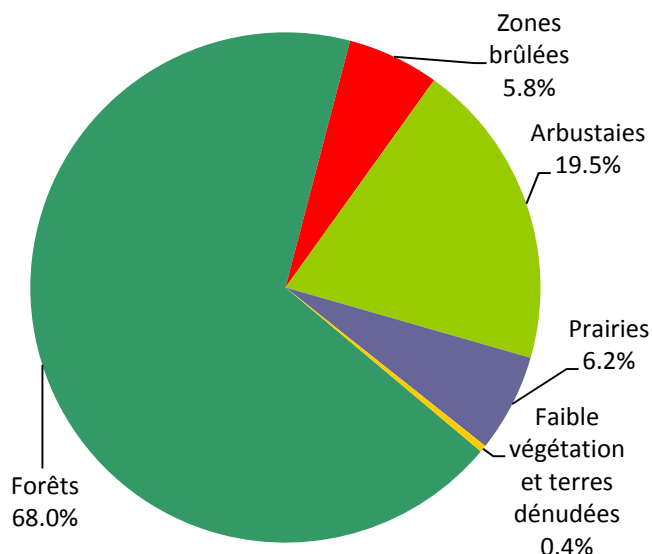


Figure 16. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de la taïga des plaines en 2005. La superficie totale du territoire se chiffre à 510 388 km<sup>2</sup>. La superficie du territoire urbain est très faible (< 0,01 %) et est établie d'après les données de l'Atlas du Canada en 1996-1997.

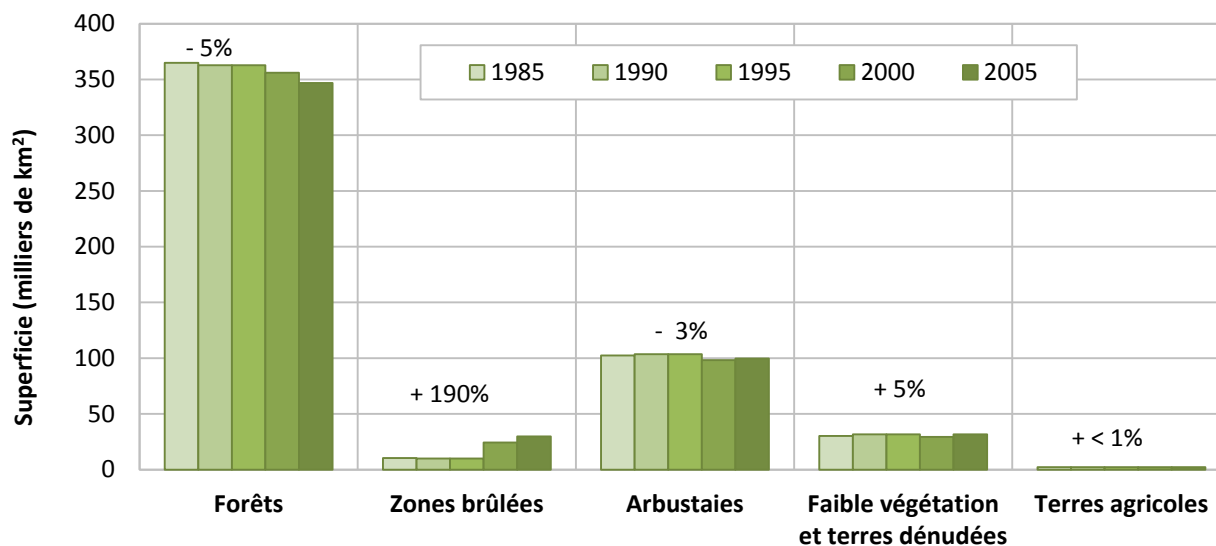


Figure 17. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de la taïga des plaines, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.

## Écozone<sup>+</sup> de la taïga du Bouclier

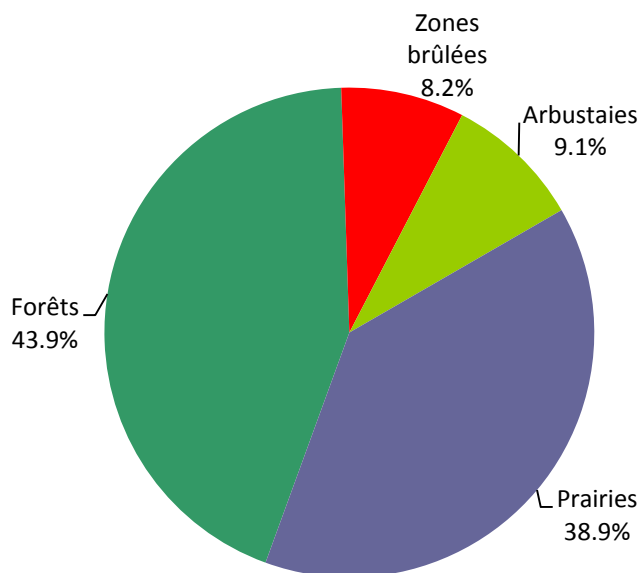


Figure 18. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de la taïga du Bouclier en 2005. La superficie du territoire dans les classes « territoire urbain », « terres agricoles » et « neige/glace/glacier » est très faible (< 0,01 %), et il n'y a aucune prairie. La superficie totale du territoire se chiffre à 1 124 419 km<sup>2</sup>.

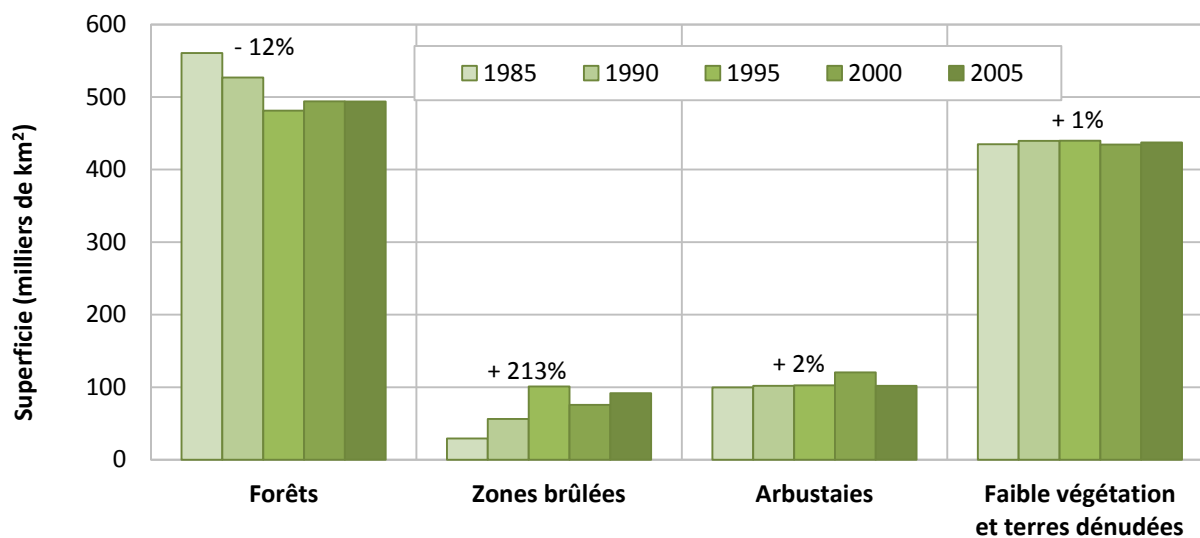


Figure 19. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de la taïga du Bouclier, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.

## Écozone<sup>+</sup> du Bouclier boréal

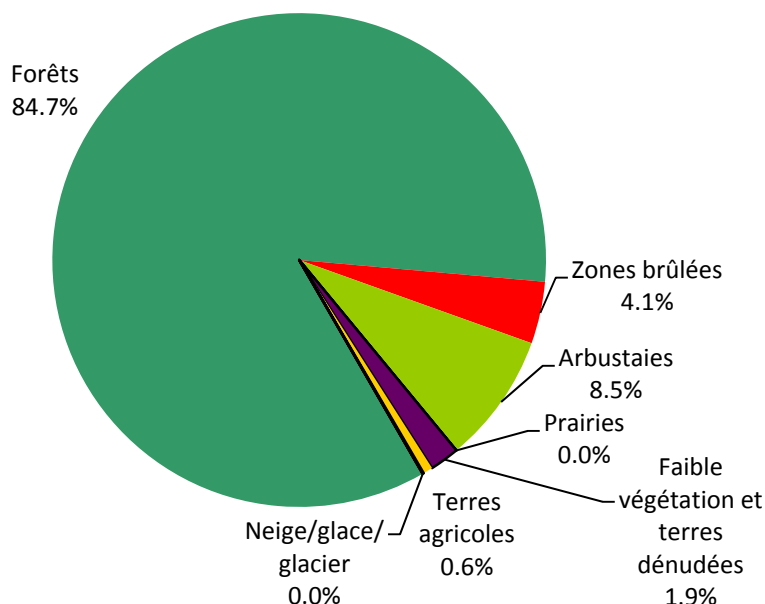


Figure 20. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> du Bouclier boréal en 2005.

La superficie du territoire dans la classe des prairies est très faible (< 0,01 %). La superficie totale du territoire se chiffre à 1 597 782 km<sup>2</sup>. Il convient de noter que la superficie du territoire urbain est établie d'après les données de l'Atlas du Canada en 1996-1997.

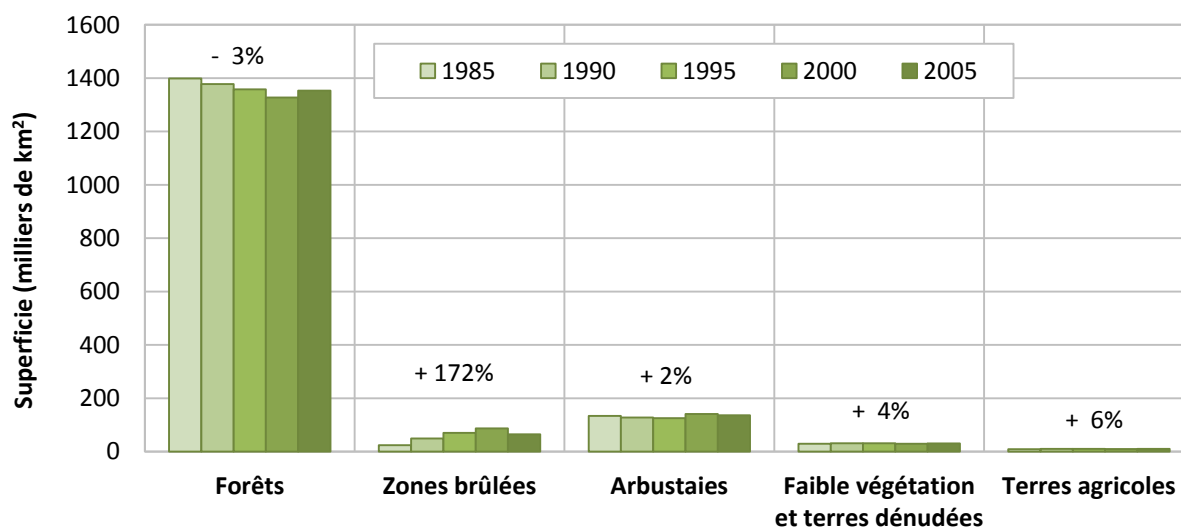


Figure 21. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> du Bouclier boréal, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005.

Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.

## Écozone<sup>+</sup> maritime de l'Atlantique

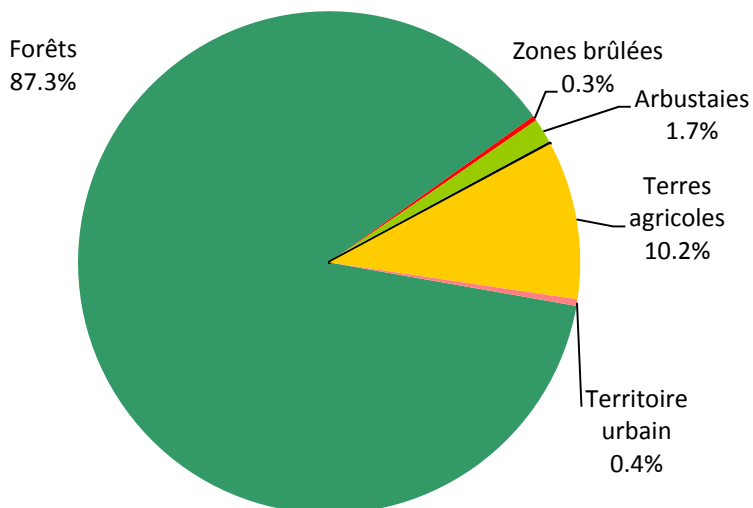


Figure 22. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> maritime de l'Atlantique en 2005. La superficie totale du territoire se chiffre à 196 049 km<sup>2</sup>. La superficie du territoire dans les classes « prairies » et « faible végétation et terres dénudées » est très faible (< 0,01 %). Il convient de noter que la superficie du territoire urbain est établie d'après les données de l'Atlas du Canada en 1996-1997.

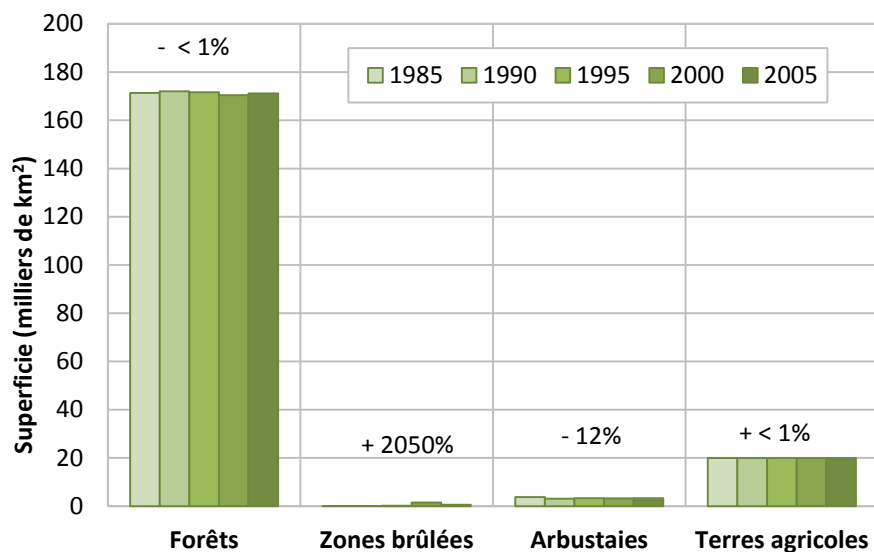


Figure 23. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> maritime de l'Atlantique, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.

## Écozone<sup>+</sup> des plaines à forêts mixtes

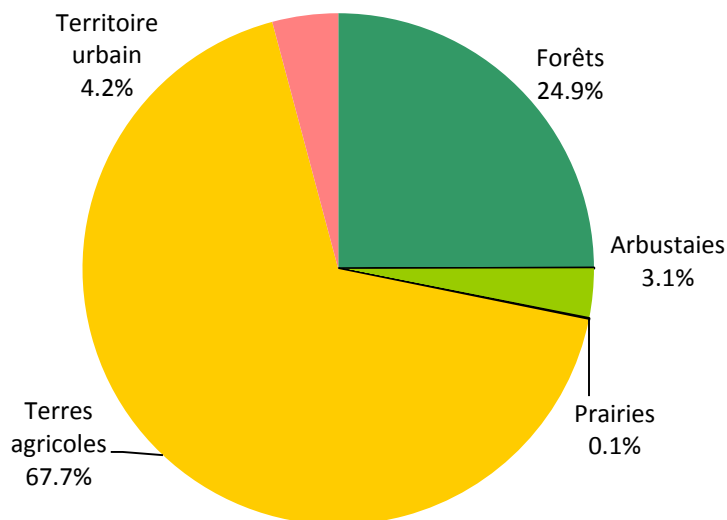


Figure 24. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> des plaines à forêts mixtes en 2005. La superficie du territoire dans les classes « faible végétation et terres dénudées » et « zones brûlées » est très faible (< 0,01 %). La superficie totale du territoire se chiffre à 111 675 km<sup>2</sup>. Il convient de noter que la superficie du territoire urbain est établie d'après les données de l'Atlas du Canada en 1996-1997.

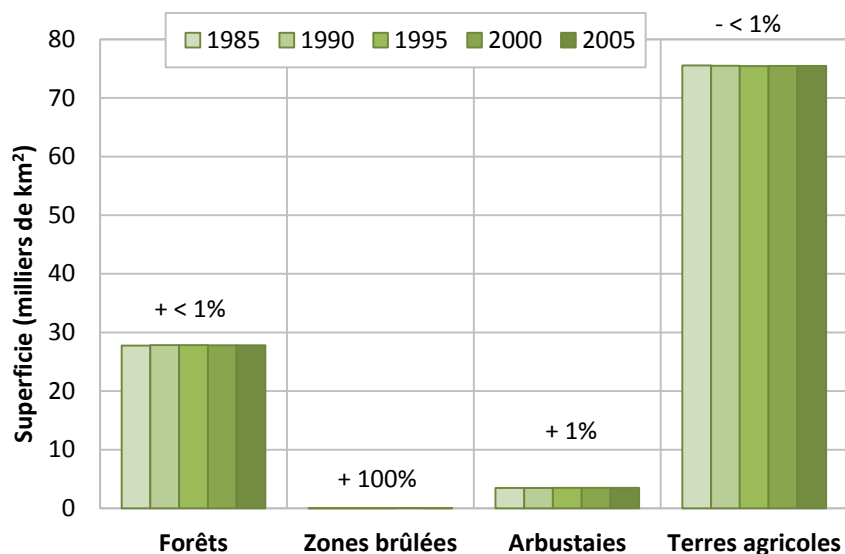


Figure 25. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> des plaines à forêts mixtes, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005.

Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.

Bien que la superficie des zones brûlées se soit accrue de 100 % au cours de cette période, la superficie totale des zones brûlées en 2005 ne se chiffrait qu'à 36 km<sup>2</sup>.

## Écozone<sup>+</sup> des plaines boréales

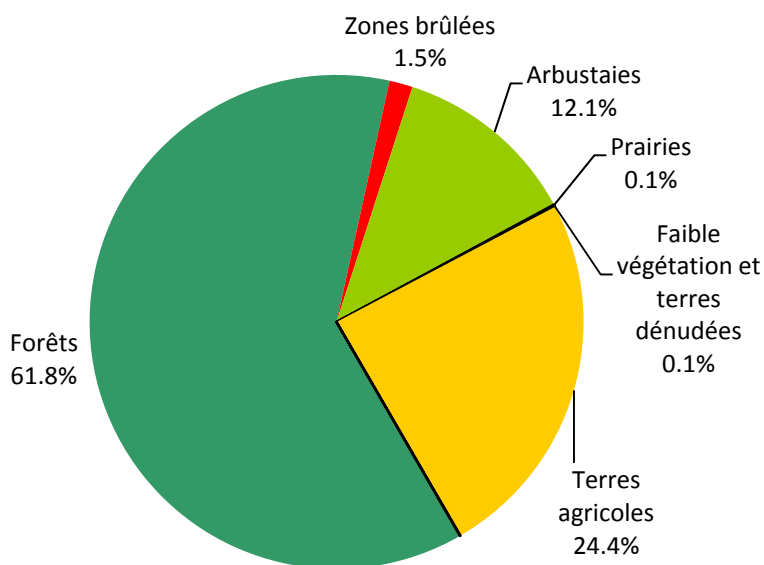


Figure 26. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> des plaines boréales en 2005.

La superficie du territoire urbain (établie d'après les données de l'Atlas du Canada en 1996-1997) est très faible (< 0,01 %). La superficie totale du territoire se chiffre à 628 102 km<sup>2</sup>.

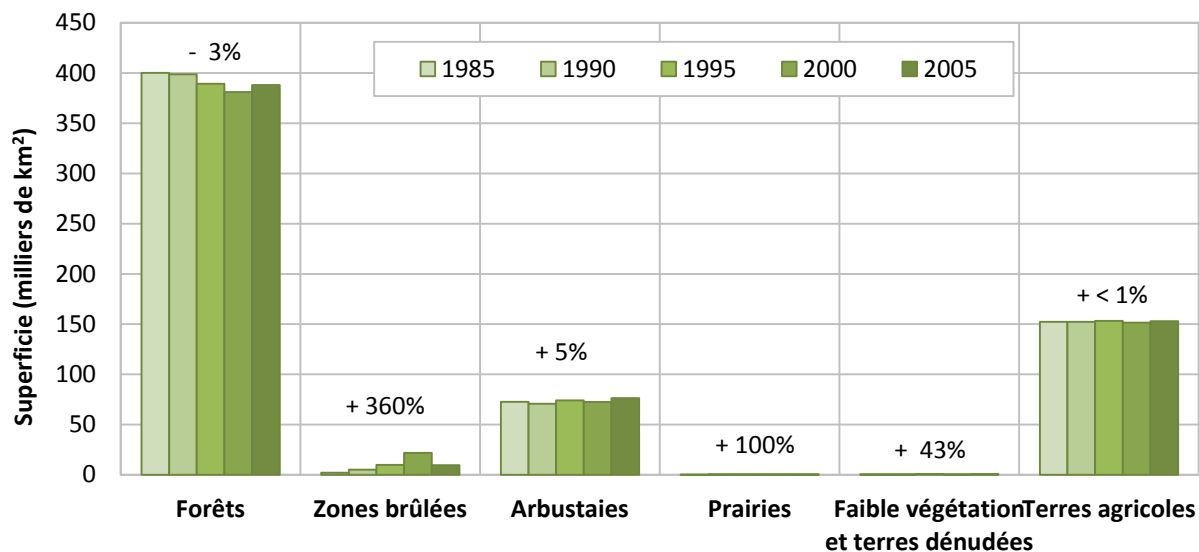


Figure 27. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> des plaines boréales, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005.

Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.

## Écozone<sup>+</sup> des Prairies

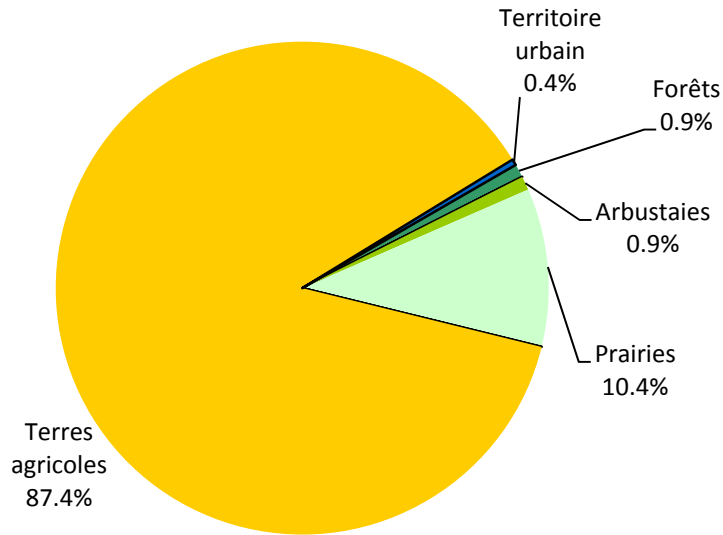


Figure 28. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> des Prairies en 2005. La superficie du territoire dans les classes « faible végétation et terres dénudées » et « zones brûlées » est très faible (< 0,01 %). La superficie totale du territoire se chiffre à 451 699 km<sup>2</sup>. Il convient de noter que la superficie du territoire urbain est établie d'après les données de l'Atlas du Canada en 1996-1997.

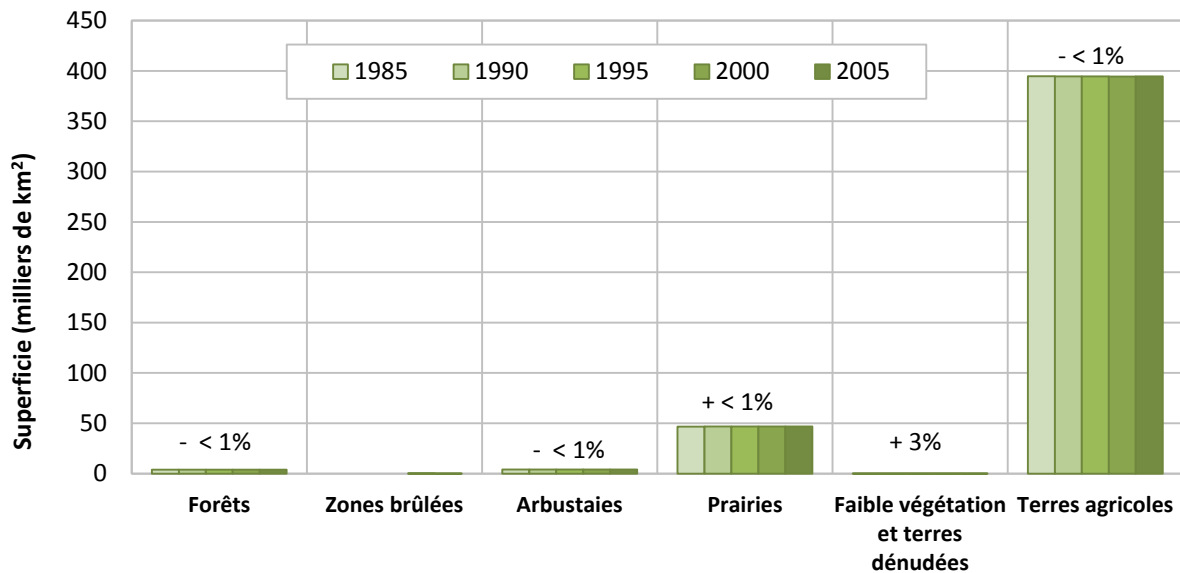


Figure 29. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> des Prairies, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005.

Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.

## Écozone<sup>+</sup> de la taïga de la Cordillère

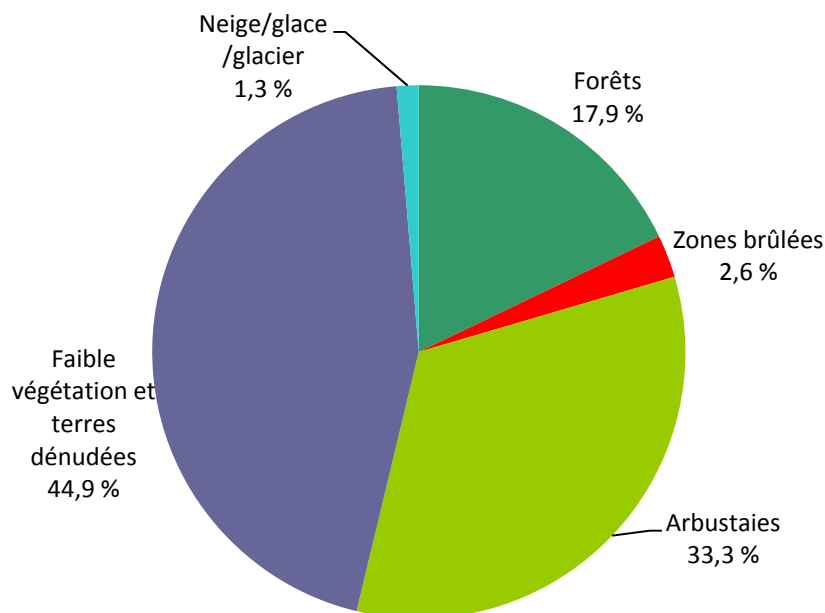


Figure 30. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de la taïga de la Cordillère en 2005. La superficie des terres agricoles est très faible (< 0,01 %). La superficie totale du territoire se chiffre à 336 528 km<sup>2</sup>.

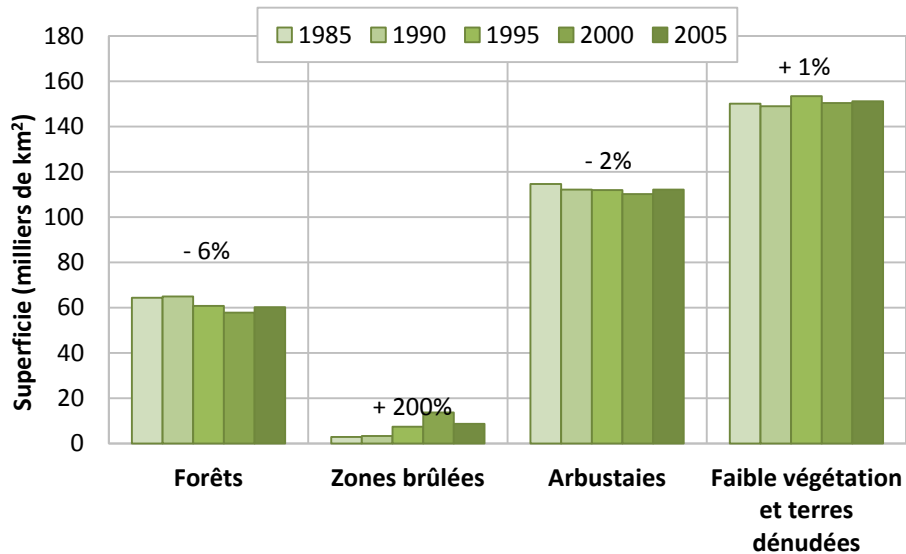


Figure 31. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de la taïga de la Cordillère, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.



## Écozone<sup>+</sup> de la Cordillère boréale

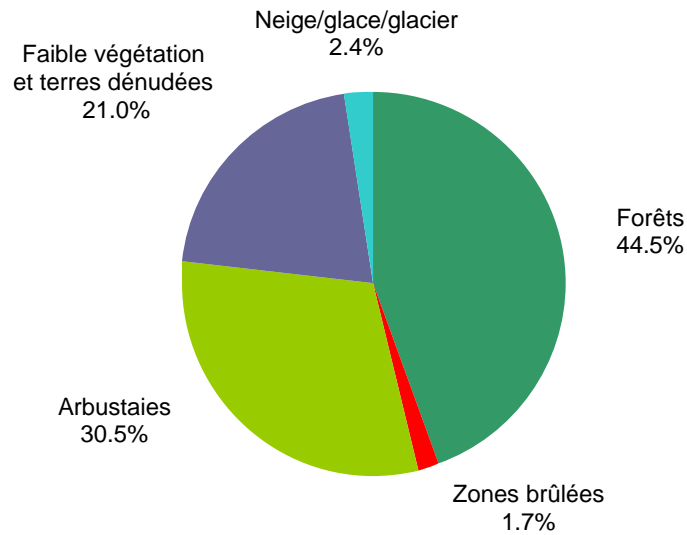


Figure 32. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de la Cordillère boréale en 2005. La superficie du territoire urbain (établie d'après les données de l'Atlas du Canada en 1996-1997) est très faible (< 0,01 %). La superficie totale du territoire se chiffre à 422 213 km<sup>2</sup>.

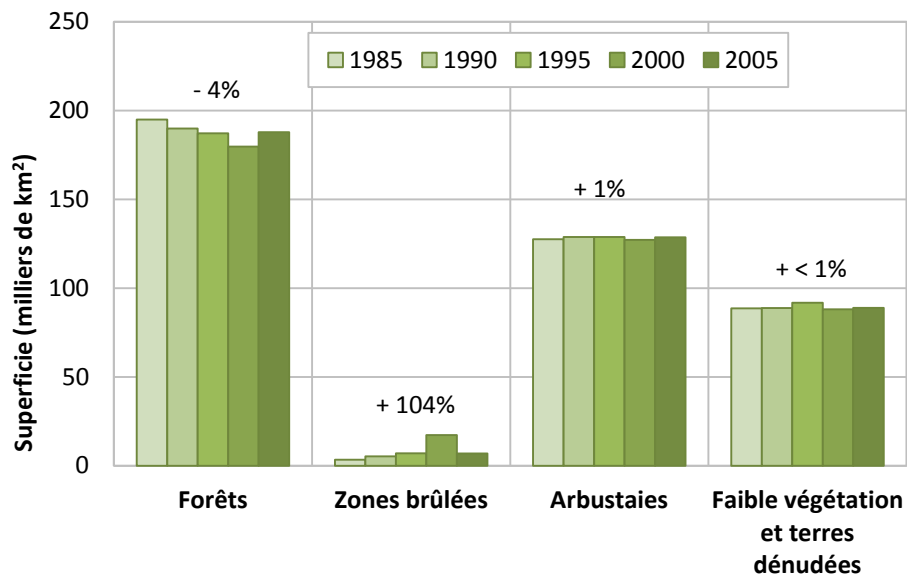


Figure 33. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de la Cordillère boréale, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005.

Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.

## Écozone<sup>+</sup> maritime du Pacifique

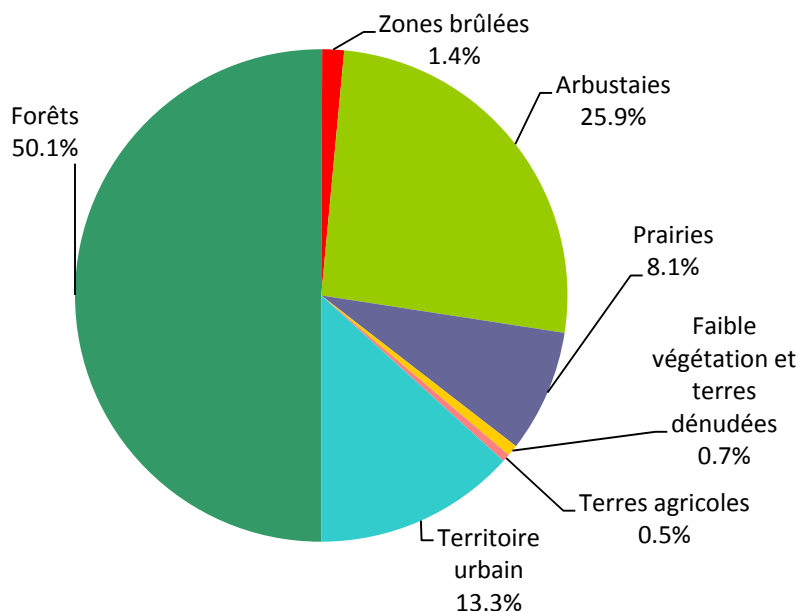


Figure 34. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> maritime du Pacifique en 2005. La superficie totale du territoire se chiffre à 177 207 km<sup>2</sup>. Il convient de noter que la superficie du territoire urbain est établie d'après les données de l'Atlas du Canada en 1996-1997.

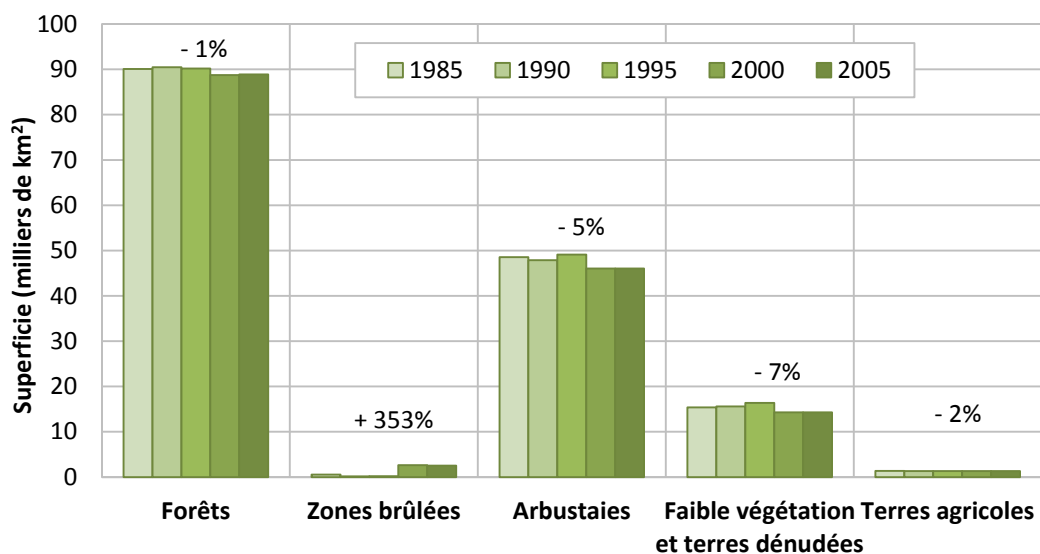


Figure 35. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> maritime du Pacifique, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.

## Écozone<sup>+</sup> de la Cordillère montagnarde

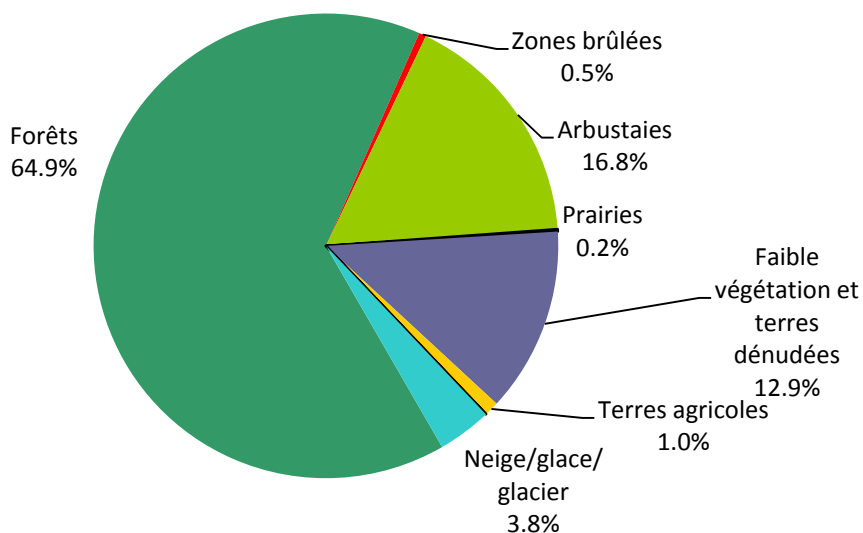


Figure 36. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de la Cordillère montagnarde en 2005.

La superficie du territoire urbain (établie d'après les données de l'Atlas du Canada en 1996-1997) est très faible (< 0,01 %). La superficie totale du territoire se chiffre à 410 155 km<sup>2</sup>.

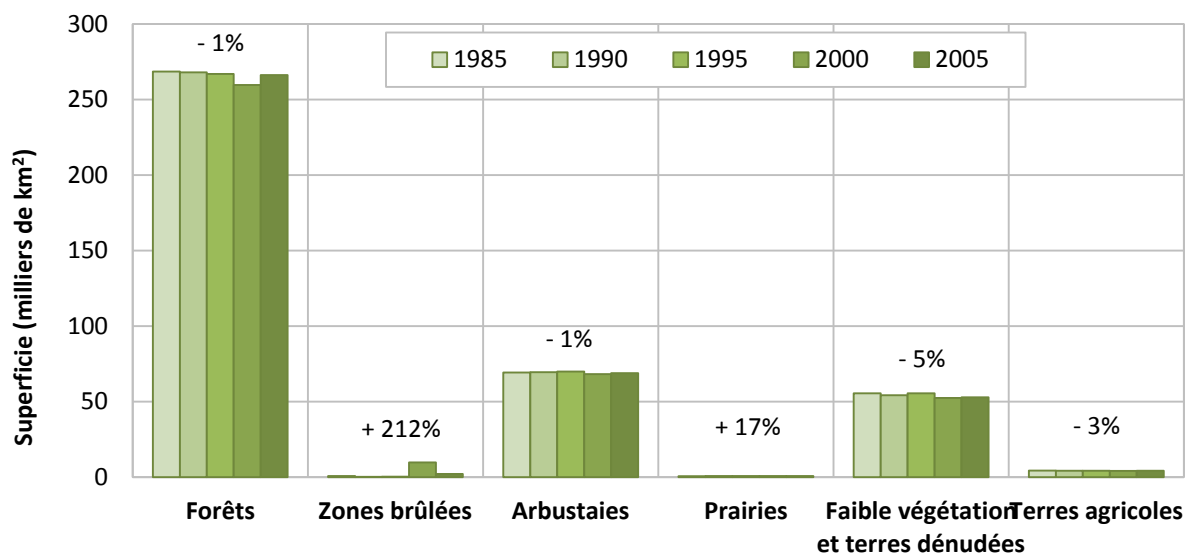


Figure 37. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de la Cordillère montagnarde, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005.

Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.

## Écozone<sup>+</sup> des plaines hudsoniennes

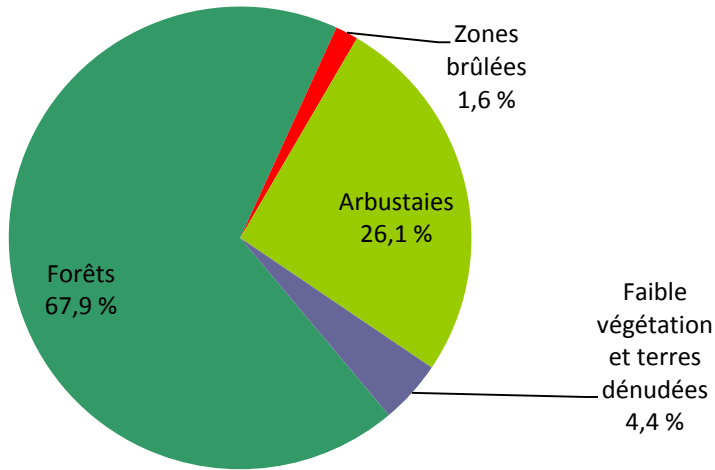


Figure 38. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> des plaines hudsoniennes en 2005. La superficie des terres agricoles est très faible (< 0,01 %). La superficie totale du territoire se chiffre à 337 595 km<sup>2</sup>.

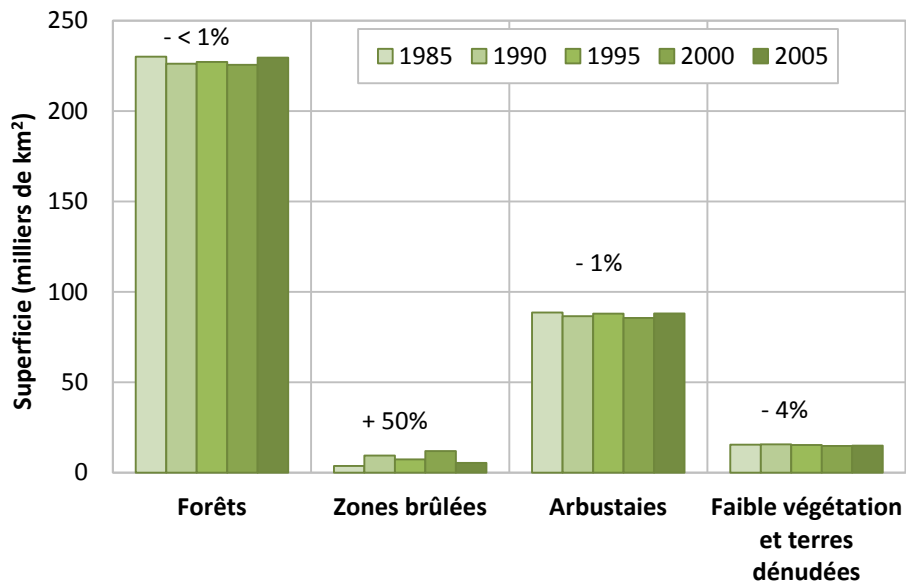


Figure 39. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> des plaines hudsoniennes, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005.

Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.

## Écozone<sup>+</sup> du bassin intérieur de l'Ouest

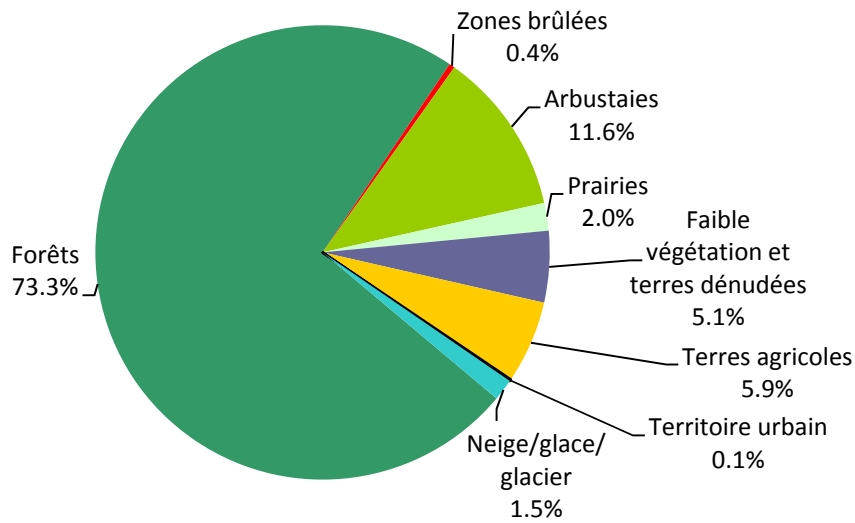


Figure 40. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> du bassin intérieur de l'Ouest en 2005. La superficie totale du territoire se chiffre à 55 279 km<sup>2</sup>. Il convient de noter que la superficie du territoire urbain est établie d'après les données de l'Atlas du Canada en 1996-1997.

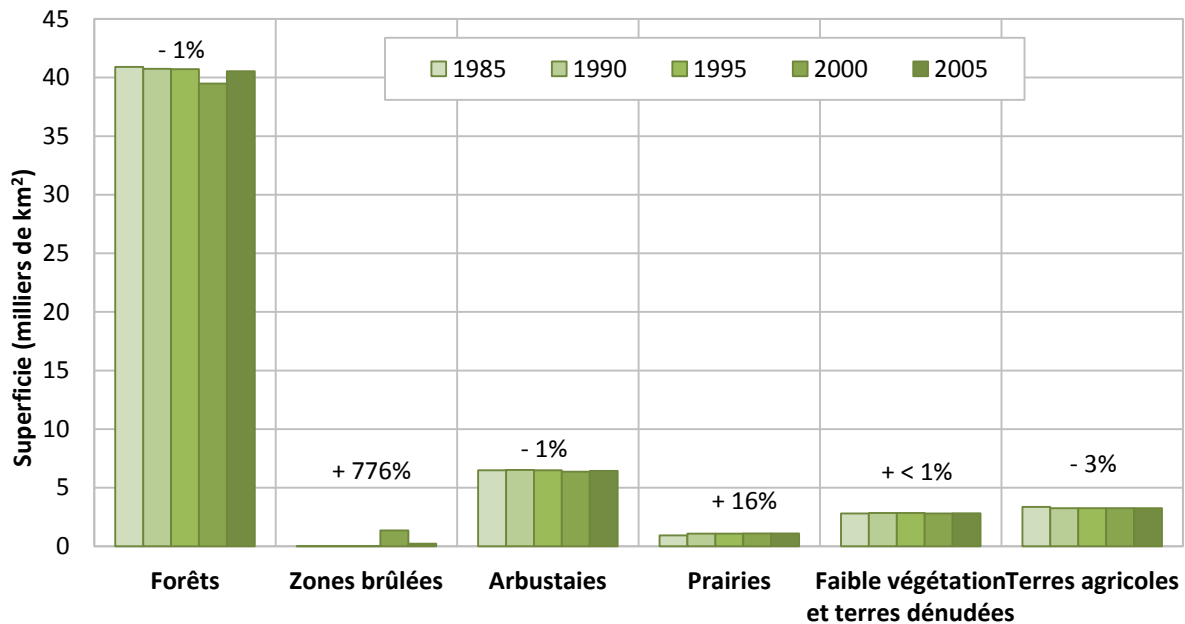


Figure 41. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> du bassin intérieur de l'Ouest, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005.

## Écozone<sup>+</sup> de la forêt boréale de Terre-Neuve

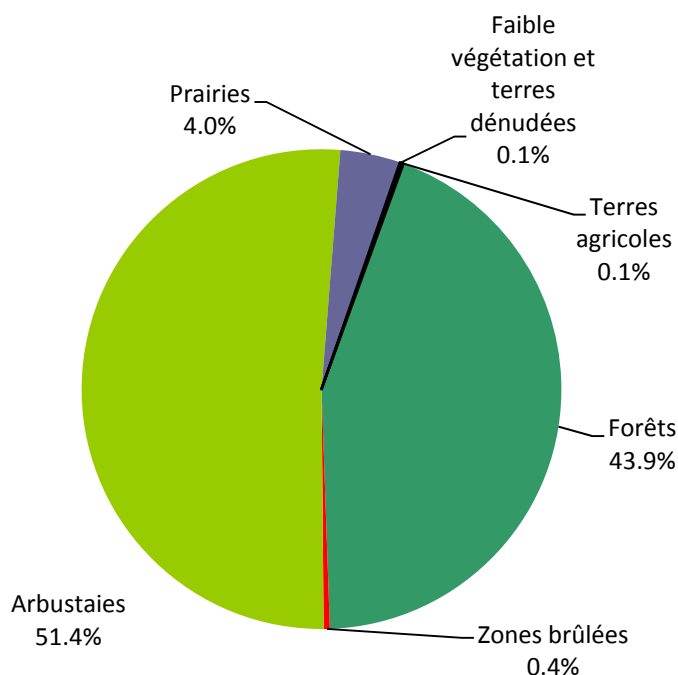


Figure 42. Couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de la forêt boréale de Terre-Neuve en 2005. La superficie totale du territoire se chiffre à 98 396 km<sup>2</sup>. Il convient de noter que la superficie du territoire urbain est établie d'après les données de l'Atlas du Canada en 1996-1997.

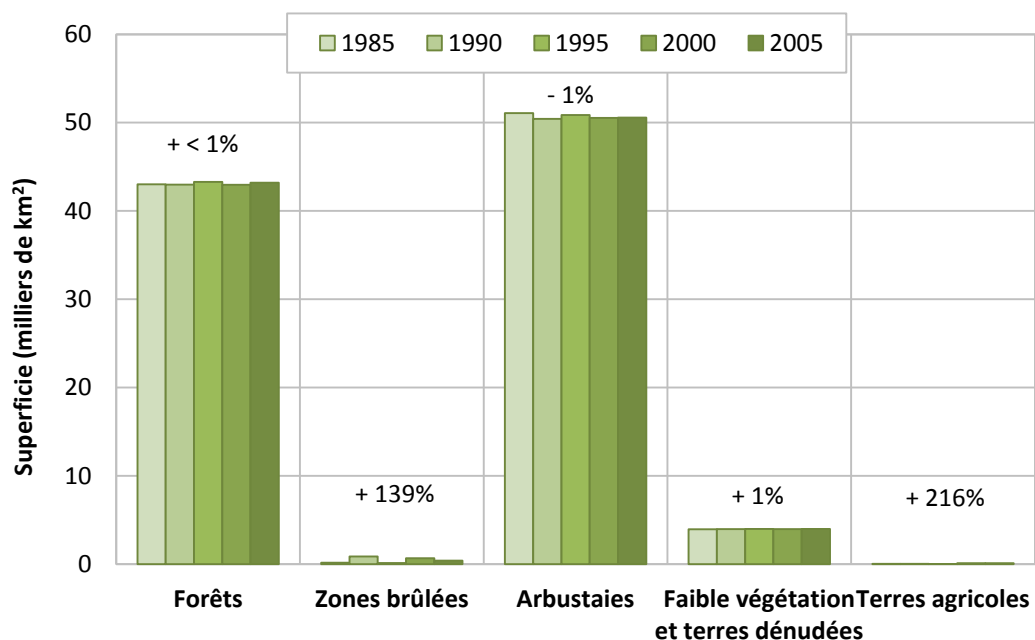


Figure 43. Superficie par classe de couverture terrestre dans l'écozone<sup>+</sup> de la forêt boréale de Terre-Neuve, 1985, 1990, 1995, 2000 et 2005. Les pourcentages indiquent le changement total pour chaque classe entre 1985 et 2005. %