



Parcs
Canada

Parks
Canada

Canada



Série de l'Atlas du carbone de Parcs Canada

Dynamique du carbone
dans les forêts des parcs
nationaux du Canada



© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par l'Agence Parcs Canada, 2023

No. de catalogue : R62-581/2023F-PDF

ISBN 978-0-660-42419-4

En savoir plus, contactez Parcs Canada à l'adresse : changementclimatique-climatechange@pc.gc.ca.

Bureau du scientifique en chef des écosystèmes
Direction générale de l'établissement et de la conservation des aires protégées
Parcs Canada
30, rue Victoria
Gatineau (Québec) J8X 0B3
Canada

Photos de la couverture :

Haut à gauche : Kat Trivers / ©Parcs Canada / Parc national Banff

Haut à droite : Éric Le Bel / ©Parcs Canada / Parc national et lieu historique national Kejimikujik

Le fond : J.F. Bergeron / ENVIROFOTO

Couverture arrière : Karen Best / ©Parcs Canada / Parc national du Mont-Revelstoke

Also available in English as: Parks Canada Carbon Atlas Series: Carbon Dynamics in the Forests of National Parks in Canada

Référence suggérée :

Sharma, T., W.A. Kurz, M. Fellows, A.L. MacDonald, J. Richards, C. Chisholm, G. Seutin, K. Richardson et K. Keenleyside (2023). Série de l'Atlas du carbone de Parcs Canada : Dynamique du carbone dans les forêts des parcs nationaux du Canada. Rapport scientifique. Agence Parcs Canada, Gatineau (Québec) Canada, 106 p.

Équipe de l'Atlas du carbone forestier :

Parcs Canada	Service canadien des forêts
Tara Sharma	Werner Kurz
Alexander MacDonald	Max Fellows
Jennifer Richards	
Chelsea Chisholm	
Karen Richardson	
Gilles Seutin	
Karen Keenleyside	
Anna Lee-Carswell	
Scott Parker	

Table des matières

	Liste des tableaux	iii
	List des figures.	iv
	Liste des sigles	vi
	Sommaire	ix
Chapitre 1 :	Introduction	1
	1.1 Carbone dans les parcs nationaux	6
	1.2 Dynamique du carbone dans les écosystèmes forestiers.	6
Chapitre 2 :	Données et méthodes	9
	2.1 Plateforme de modélisation	12
	2.2 Données spatiales	15
	2.2.1 Données de l’inventaire forestier.	15
	2.2.2 Perturbations.	16
	2.3 Données non spatiales.	20
	2.3.1 Courbes de rendement	20
	2.3.2 Matrices des perturbations	21
	2.4 Analyse	22
Chapitre 3 :	Résultats	23
	3.1 Stocks et densité de carbone.	24
	3.1.1 Variation entre les réservoirs de carbone définis par le GIEC	28
	3.1.2 Répartition spatiale.	29
	3.1.3 Changements temporels dans les stocks et la densité de carbone.	30
	3.2 Flux de carbone	39
	3.2.1 Production primaire nette, respiration hétérotrophe et productivité nette de l’écosystème	39
	3.2.2 Effets des perturbations sur les flux de carbone	44
	3.2.3 Productivité nette du biome.	46
	3.2.4 Émissions de gaz à effet de serre.	50

Chapitre 4 :	Discussion	55
	4.1 Répartition spatiale des stocks et des densités de carbone.....	56
	4.2 Tendances temporelles des stocks et de la densité de carbone.....	58
	4.3 Flux de carbone et émissions de GES	59
	4.4 Lacunes et orientations futures	62
	4.5 Incidences sur la gestion.....	64
	4.6 Résumé	65
	Remerciements	67
	Références	69
	Glossaire	77
Annexe A :	Noms scientifiques des insectes forestiers	81
Annexe B :	Matrices des perturbations pour les brûlages dirigés (cime) et le dendroctone du pin ponderosa (très grave)	82
Annexe C :	Densité moyenne de carbone (t C ha⁻¹) dans les réservoirs des parcs, définis par le GIEC (1990 à 2020)	85
Annexe D :	Répartition spatiale de la densité totale de carbone de l'écosystème en 2020 (parcs regroupés par écozone)	86
	Annexe Di : Écozone maritime de l'Atlantique.....	87
	Annexe Dii : Écozone des plaines boréales	89
	Annexe Diii : Écozone du bouclier boréal	91
	Annexe Div : Écozone des plaines à forêts mixtes	93
	Annexe Dv : Écozone de la cordillère montagnarde.....	95
	Annexe Dvi : Écozone maritime du Pacifique.....	98
	Annexe Dvii : Écozone des prairies	99
Annexe E :	Flux de carbone moyens par parc (1990 à 2020)	100
Annexe F :	Superficie forestière totale (km²) touchée par les perturbations (de 1990 à 2020) ..	101
Annexe G :	Productivité annuelle nette du biome par parc (en t C ha⁻¹ an⁻¹)	102

Liste des tableaux

Tableau 1.	Description de cinq réservoirs de carbone de l'écosystème définis par le GIEC... 3
Tableau 2.	Couvert forestier dans 31 parcs nationaux dont 10 % ou plus de la superficie est constituée de forêts, regroupés par écozone... 10
Tableau 3.	Inventaire forestier et données sur les perturbations utilisées dans les simulations du MGBC. 18
Tableau 4.	Stocks et densité de carbone forestier dans les réservoirs définis par le GIEC dans 31 parcs nationaux (moyenne de 1990 à 2020). L'écart-type représente la variabilité d'une année à l'autre. 24
Tableau 5.	Stocks de carbone forestier dans les réservoirs définis par le GIEC et densité de carbone de l'écosystème, par écozone et parc national (moyenne de 1990 à 2020)... 26
Tableau 6.	Flux de carbone forestier et bilan net des GES dans 31 parcs nationaux (de 1990 à 2020). Les écarts-types représentent la variabilité temporelle et non l'incertitude statistique... 39
Tableau 7.	Flux et transferts de carbone forestier (kt C) résultant des perturbations dans 31 parcs nationaux (total pour la période de 1990 à 2020)... 44
Tableau 8.	Émissions annuelles totales et moyennes de GES des écosystèmes forestiers dans 31 parcs nationaux 53

List des figures

Figure 1.	Carbone de la biomasse aérienne par rapport au carbone du sol, par type d'écosystème	4
Figure 2.	Étendue des forêts aménagées et non aménagées au Canada en 2017, telle que définie aux fins de l'estimation et de la déclaration des émissions et des absorptions de GES pour les éditions annuelles du Rapport d'inventaire national (RIN).	5
Figure 3.	Émissions annuelles nettes de carbone et zones touchées par les perturbations naturelles dans les forêts aménagées du Canada : de 1990 à 2019.	8
Figure 4.	Répartition des parcs nationaux ayant 10 % ou plus de leur superficie représentée par des écosystèmes forestiers dans les écozones du Canada	11
Figure 5.	Schéma du Modèle générique du bilan du carbone (MGBC) montrant les entrées et les sorties du modèle, ainsi que les processus simulés	13
Figure 6.	Illustration des courbes de rendement pour le volume de bois d'œuvre marchand pour les espèces dans différentes unités d'analyse (UA) en Colombie-Britannique.	21
Figure 7.	Stocks de carbone forestier (moyenne de 1990 à 2020) dans les réservoirs définis par le GIEC dans le parc national Wood Buffalo comparativement à tous les autres parcs combinés	25
Figure 8.	Proportion des stocks de carbone forestier dans les réservoirs définis par le GIEC dans 31 parcs (moyenne de 1990 à 2020)	28
Figure 9.	Proportion de la densité de carbone forestier dans les réservoirs définis par le GIEC par écozone	29
Figure 10.	Répartition spatiale de la densité de carbone de l'écosystème forestier ($t\ C\ ha^{-1}$) dans certains parcs et écozones en 2020.	30
Figure 11.	Biomasse forestière (aérienne + souterraine), stocks de carbone de matière organique morte (MOM) et densité totale de carbone de l'écosystème dans les 31 parcs nationaux entre 1990 et 2020.	31
Figure 12a.	Tendance temporelle de la densité de carbone forestier dans 29 parcs nationaux qui ont montré une augmentation globale entre 1990 et 2020.	32
Figure 12b.	Tendance temporelle de la densité de carbone forestier pour deux parcs nationaux qui ont montré une diminution de la densité entre 1990 et 2020	33
Figure 13a.	Changements temporels de la biomasse, de la MOM et de la densité totale de carbone de l'écosystème ($t\ C\ ha^{-1}$) dans les écosystèmes forestiers du PN Kouchibouguac (1990, 2010 et 2020).	35

Figure 13b.	Changements temporels de la biomasse, de la MOM et de la densité totale du carbone de l'écosystème (t C ha ⁻¹) dans les écosystèmes forestiers du PN des Lacs-Waterton (1990, 2010 et 2020).	36
Figure 13c.	Changements temporels de la biomasse, de la MOM et de la densité totale du carbone de l'écosystème (t C ha ⁻¹) dans les écosystèmes forestiers du PN Pukaskwa (1990, 2010 et 2020).	37
Figure 13d.	Changements temporels de la biomasse, de la MOM et de la densité totale du carbone de l'écosystème (t C ha ⁻¹) dans les écosystèmes forestiers du PN de Prince Albert (1990, 2010 et 2020).	38
Figure 14.	Tendance temporelle des flux de carbone (mesurés en tant que PPN, R _n , PNE) pour les écosystèmes forestiers dans les 31 parcs nationaux de 1990 à 2020.	40
Figure 15.	Flux de carbone par unité de surface (moyenne de 1990 à 2020) par écozone.	41
Figure 16a.	Productivité nette de l'écosystème de cinq parcs nationaux qui ont affiché une augmentation entre 1990 et 2020.	42
Figure 16b.	Productivité nette de l'écosystème de 26 parcs nationaux qui ont affiché une diminution entre 1990 et 2020.	43
Figure 17.	Répercussions des changements de la superficie perturbée par les feux de forêt sur la productivité nette de l'écosystème (PNE) pour les écosystèmes forestiers du parc national Wood Buffalo (de 1990 à 2020).	44
Figure 18.	Transferts de la biomasse vers la MOM (axe vertical droit) dus à la zone touchée par les feux de forêt et d'autres perturbations dans 31 parcs (de 1990 à 2020).	45
Figure 19.	Total de la PNB pour les écosystèmes forestiers, par parc et écozone entre 1990 et 2020.	47
Figure 20a.	Productivité nette du biome dans 21 parcs nationaux touchés par des perturbations peu fréquentes ou mineures au cours de la période de 1990 à 2020.	48
Figure 20b.	Productivité nette du biome dans 10 parcs nationaux touchés par des perturbations fréquentes ou importantes au cours de la période de 1990 à 2020	49
Figure 21.	Variation annuelle de la PNB (axe de gauche) et de la PNB cumulative (axe de droite) pour les écosystèmes forestiers dans 31 parcs au cours de la période de 1990 à 2020.	50
Figure 22.	Émissions totales de GES (Mt éq. CO ₂) provenant des écosystèmes forestiers, par parc et écozone, entre 1990 et 2020.	52
Figure 23.	Émissions nettes annuelles et cumulatives de GES (Mt éq. CO ₂) pour les écosystèmes forestiers et les zones touchées par les feux de forêt, pour les 31 parcs nationaux entre 1990 et 2020.	54

Liste des sigles

Sigle	Description
AE	Aérienne
an	année
BD	Brûlage dirigé
BIOME-BGC	Cycle biogéochimique du biome
C	Carbone
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CO ₂	Dioxyde de carbone
CPC	Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques
éq. CO ₂	Équivalent en dioxyde de carbone
FLINT	Full Lands Integration Tool [outil complet d'intégration des terres]
FORCARB	FORest CARBon Budget Model [modèle du bilan du carbone forestier] des États-Unis
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ha	Hectare
LHN	Lieu historique national
Mg ha ⁻¹	Mégagrammes par hectare (= tonnes par hectare)
Mg ha ⁻¹ an ⁻¹	Mégagrammes par hectare par année
MGBC	Modèle générique du bilan du carbone (ou le Modèle)
Mha	Million d'hectares
MOM	Matière organique morte
MP	Matrices des perturbations
Mt C	Mégatonne de carbone
Mt C an ⁻¹	Mégatonne de carbone par année
N ₂ O	Oxyde nitreux
PC	Parcs Canada

Sigle	Description
PMN	Parc marin national
PN	Parc national
PNB	Production nette du biome
PNBM	Parc national Bord de mer
RPN	Réserve de parc national
PNE	Production nette de l'écosystème
PPN	Production primaire nette
PRP	Potentiel de réchauffement planétaire
PUN	Parc urbain national
R_h	Respiration hétérotrophe
RIN	Rapport d'inventaire national
SCF	Service canadien des forêts
SIG	Système d'information géographique
SNSCPRCF	Système national de surveillance, de comptabilisation et de production de rapports concernant le carbone des forêts
SP	Site du patrimoine
ST	Souterraine
t C ha ⁻¹ an ⁻¹	Tonne de carbone par hectare par année
t	Tonne métrique = Mg

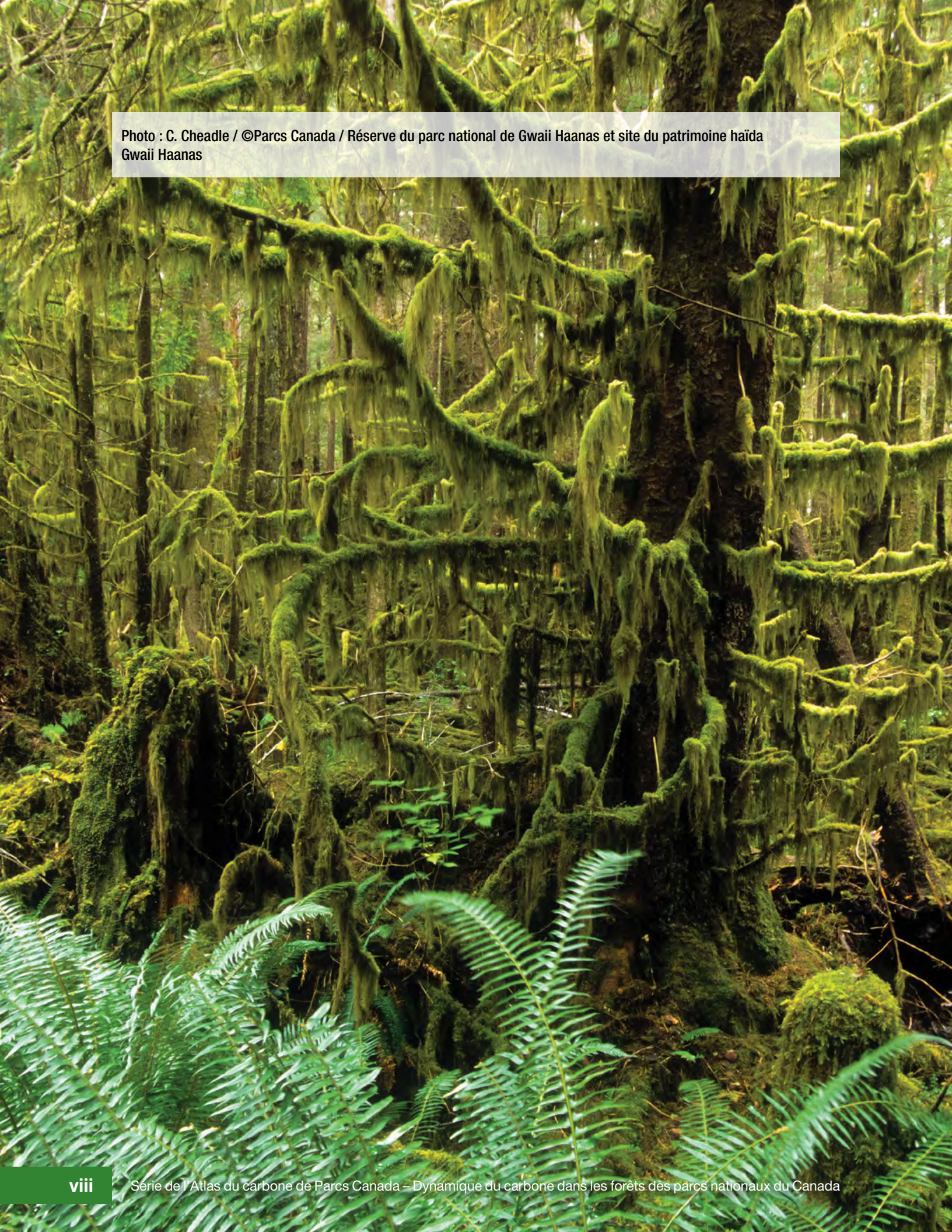
A photograph of a lush, moss-covered forest. The trees are heavily laden with vibrant green moss, which hangs in long, thick strands from the branches. The forest floor is also covered in moss and ferns. The lighting is soft and diffused, creating a serene and ancient atmosphere.

Photo : C. Cheadle / ©Parcs Canada / Réserve du parc national de Gwaii Haanas et site du patrimoine haïda Gwaii Haanas



Photo : Ryan Bray / ©Parcs Canada / Parc national Jasper

Sommaire

La série de l'Atlas du carbone de Parcs Canada est la première analyse exhaustive de la quantité, de la répartition et de la dynamique du carbone naturel dans les parcs nationaux du Canada¹. L'objectif de la série est d'estimer et de cartographier la quantité de carbone stocké, séquestré et émis par tous les écosystèmes des parcs nationaux. Ce premier volume de la série, intitulé *Dynamique du carbone dans les forêts des parcs nationaux du Canada*, évalue les écosystèmes forestiers. Il a été préparé en collaboration avec le Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada. Les volumes suivants évalueront la dynamique du carbone d'autres grands écosystèmes.

Le réseau des parcs nationaux du Canada protège des exemples représentatifs exceptionnels des régions naturelles distinctes du pays et des processus naturels qui contribuent à les définir. En plus de protéger la biodiversité, de maintenir l'intégrité écologique et de fournir de l'eau, de l'air et des sols propres, entre autres services écosystémiques, les parcs nationaux et les autres aires protégées séquestrent également le gaz carbonique (CO₂) atmosphérique et permettent de le stocker dans les arbres, d'autres végétaux, la matière organique morte et les sols. De cette façon, les écosystèmes accumulent le carbone au fil du temps en absorbant le CO₂, le principal gaz à effet de serre (GES) résultant des activités humaines, à partir de l'atmosphère et en le stockant dans différents réservoirs de carbone, comme la biomasse aérienne et souterraine et la matière organique morte, y compris les sols. En même temps, une partie de ce carbone est

1 Par souci de commodité, les termes « parcs » ou « parcs nationaux » sont utilisés dans le présent rapport lorsqu'ils font référence aux aires protégées de manière collective. Lorsqu'il est question d'une aire en particulier, la désignation appropriée est employée, c.-à-d. parc national (PN), réserve de parc national (RPN), parc marin national (PMN).

lentement rejetée dans l'atmosphère par la décomposition de la matière organique. Les feux de forêt et d'autres perturbations naturelles, comme les épidémies d'insectes, peuvent également causer des émissions rapides de CO₂ et de GES plus puissants comme le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O) dans l'atmosphère. Les écosystèmes sont considérés comme un puits de carbone net lorsqu'ils séquestrent plus de carbone qu'ils n'en émettent, et comme une source de carbone lorsqu'ils émettent plus de carbone qu'ils n'en séquestrent à partir de l'atmosphère au cours d'une période donnée. La capacité des écosystèmes à réguler le climat par la séquestration et le stockage du carbone est un service écosystémique primordial et un élément essentiel du cycle mondial du carbone. Les parcs nationaux et les autres aires protégées sont des milieux importants où il est possible d'étudier et de mieux comprendre la dynamique du carbone des écosystèmes naturels et le rôle des approches de conservation comme solutions climatiques naturelles.

Cette étude porte sur les 31 parcs nationaux où le couvert forestier représente plus de 10 % de la superficie totale du parc. La dynamique du carbone dans les zones forestières a été évaluée à l'aide de la dernière génération du modèle générique du bilan du carbone (MGBC) spatialement explicite élaboré par le Service canadien des forêts en collaboration avec des experts de *Moja Global*². Les stocks de carbone dans différents réservoirs et les flux et transferts de carbone entre les réservoirs, ainsi que les émissions et les absorptions de GES, ont été estimés à des étapes temporelles annuelles entre 1990 et 2020. Les résultats ont été agrégés à l'échelle du parc et de l'écozone et combinés pour les 31 parcs. Ils ont été présentés en unités de carbone (C) pour les stocks totaux (mégatonnes ou Mt), la densité du stock (tonnes par hectare = mégagrammes par hectare) ainsi que les flux totaux (Mt) et la densité du flux (tonnes par hectare par année), et en unités d'équivalents en dioxyde de carbone (éq. CO₂) pour les émissions de GES dans l'atmosphère et leur absorption à partir de l'atmosphère.

2 De plus amples renseignements sur l'organisation Moja Global se trouvent à <https://moja.global> [en anglais seulement].

Principales constatations

Stockage et densité de carbone

- Les 5,6 millions d'hectares d'écosystèmes forestiers dans **31 parcs nationaux ont permis de stocker $1\,452 \pm 11$ Mt C (moyenne sur 31 ans)**, allant de 1 431 Mt C en 1990 à 1 466 Mt C en 2002, puis diminuant à 1 438 Mt C en 2020, **avec un gain net d'environ 6,8 Mt C au cours de ces 31 années**. Plus de 70 % du carbone stocké se trouvait dans les réservoirs de sol, de bois mort et de litière, le sol étant le plus grand réservoir de carbone (38 %).
- Les **forêts du parc national Wood Buffalo étaient celles qui ont stocké le plus de carbone (844 ± 11 Mt C)**, soit 58 % du carbone total stocké dans toutes les forêts de parcs nationaux étudiées. Le parc national Wood Buffalo est le plus grand parc national du Canada, représentant 58 % de la superficie forestière totale des 31 parcs étudiés. En raison de la grande superficie qui a été brûlée, le parc national Wood Buffalo a perdu 9,4 Mt C entre 1990 et 2020.
- **La densité moyenne de carbone des écosystèmes forestiers dans les parcs nationaux était de 258 ± 2 tonnes de carbone par hectare ($t\ C\ ha^{-1}$)**. À l'échelle des écozones, les forêts des parcs nationaux de l'écozone maritime du Pacifique présentaient la densité la plus élevée de carbone ($439 \pm 5\ t\ C\ ha^{-1}$), en partie en raison de la très faible fréquence des feux de forêt et de la présence de forêts anciennes. Les forêts des parcs nationaux de l'écozone des plaines à forêts mixtes comptaient la plus faible densité moyenne de carbone ($158 \pm 5\ t\ C\ ha^{-1}$). À l'échelle de chaque parc, les forêts de la réserve de parc national Pacific Rim affichaient la densité moyenne de carbone la plus élevée ($477 \pm 4\ t\ C\ ha^{-1}$), tandis que les forêts du parc national de la Péninsule-Bruce présentaient la densité la plus faible ($150 \pm 5\ t\ C\ ha^{-1}$). Les forêts de la réserve de parc national des Îles-Gulf affichaient la plus forte augmentation de la densité de carbone au cours de la période de l'étude ($39\ t\ C\ ha^{-1}$), tandis que les forêts du parc national des Lacs-Waterton montraient la plus forte diminution ($18\ t\ C\ ha^{-1}$).

Flux de carbone et émissions de gaz à effet de serre

- **Les écosystèmes forestiers de 28 parcs nationaux étaient des puits de carbone nets, tandis que ceux de trois parcs nationaux** (parc national Wood Buffalo, parc national des Lacs-Waterton et parc national Elk Island représentant 59 % de la superficie forestière totale) **étaient des sources nettes de gaz à effet de serre (GES) au cours de la période de 31 ans.**
 - **Les forêts du parc national Pukaskwa** constituaient le plus grand puits absolu de carbone, absorbant 0,3 Mt d'éq. CO₂ par année (1,85 t d'éq. CO₂ ha⁻¹ an⁻¹) de l'atmosphère.
 - **Les forêts de la réserve de parc national des Îles-Gulf ont séquestré le plus de carbone par unité de surface** (4,74 t d'éq. CO₂ ha⁻¹ an⁻¹).
 - **Les forêts du parc national Wood Buffalo représentaient la plus importante source absolue de GES dans l'atmosphère**, émettant 2 Mt éq. CO₂ par année (0,62 t éq. CO₂ ha⁻¹ an⁻¹).
 - **Les forêts du parc national des Lacs-Waterton ont émis le plus de GES par unité de surface** (2,41 t d'éq. CO₂ ha⁻¹ an⁻¹), surpassant même le parc national Wood Buffalo pour cette mesure.
- **Dans l'ensemble, les écosystèmes forestiers des 31 parcs nationaux représentaient un petit puits de carbone**, accumulant plus de carbone qu'ils n'en libéraient pendant la période de l'étude. Les forêts des parcs nationaux présentaient un gain cumulatif de carbone de 6,8 Mt C et une absorption nette moyenne de carbone de 0,22 ± 0,13 Mt C par année au cours de l'étude de 31 ans.
- **Dans l'ensemble, les forêts des parcs nationaux constituaient une source nette d'émissions de gaz à effet de serre (GES) pendant la période de l'étude, en raison de perturbations naturelles dans seulement trois parcs.** Cumulativement, les forêts des parcs nationaux ont émis un total de 6,25 Mt d'éq. CO₂, ou 0,20 ± 0,52 Mt d'éq. CO₂ par année en GES. Le fait contre-intuitif que les parcs constituaient un petit *puits* de carbone, mais aussi une *source* de gaz à effet de serre (mesurés en équivalents en dioxyde de carbone, éq. CO₂), s'explique parce que les émissions résultant de la décomposition et des feux de forêt comprenaient des gaz autres que le CO₂, comme le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O), présentant des potentiels de réchauffement planétaire beaucoup plus élevés que le CO₂.
- Toutefois, sur une échelle annuelle, les parcs **constituaient un puits net d'émissions de GES pendant 21 des 31 années étudiées et une source nette pendant d'autres années.** L'augmentation des perturbations naturelles (feux de forêt et épidémies d'insectes) dans quelques parcs après 2002 a entraîné une augmentation des émissions de GES, les émissions les plus importantes ayant eu lieu entre 2012 et 2020, convertissant les parcs d'un puits net de 1990 à 2002 à une source importante de 2012 à 2020.

- Les **grands parcs** (p. ex., le parc national Wood Buffalo) **et les perturbations importantes dans les parcs** (p. ex., les grands incendies récents dans le parc national Wood Buffalo et le parc national des Lacs-Waterton) **ont dominé la dynamique du carbone et l'équilibre des émissions de GES** à l'échelle nationale pendant la période de l'étude.
- **Les feux de forêt et les épidémies d'insectes dans les forêts des parcs nationaux étaient les principaux facteurs à l'origine des émissions de GES, les feux de forêt ayant contribué plus que les épidémies d'insectes.** La plupart des émissions provenant des feux de forêt étaient attribuables à la consommation de matière organique morte (p. ex., litière, bois mort) pendant les feux de forêt.
- **Les feux de forêt ont également entraîné d'importants transferts de la biomasse aérienne et souterraine des réservoirs de carbone vers les réservoirs de matière organique morte.** Ces transferts étaient particulièrement évidents dans les grands parcs nationaux qui ont connu de gros incendies, comme les parcs nationaux Wood Buffalo et des Lacs-Waterton.
- Enfin, **l'âge et la structure des forêts, les caractéristiques de l'aire protégée, la composition des espèces et les régimes de perturbation naturelle des forêts** ont été à l'origine de la plus grande partie de la variabilité du stockage, de l'absorption et des émissions de carbone dans les parcs et les écozones.

Répercussions éventuelles

Ces travaux fournissent les premières estimations des stocks, des densités et des flux de carbone, ainsi que de leur variabilité spatiale et temporelle, pour les écosystèmes forestiers de 31 parcs nationaux du Canada. Des variations notables de toutes les mesures à l'intérieur des parcs nationaux et des écozones et entre eux renforcent l'importance d'adopter une approche spatialement et temporellement explicite pour étudier ces caractéristiques.

Les solutions climatiques naturelles sont de plus en plus considérées comme des contributions importantes aux objectifs de réduction des émissions de GES. Dans ce contexte, les aires protégées et la gestion des ressources naturelles adaptée au climat sont proposées comme mécanismes pour soutenir et accroître les puits de carbone naturels. La présente étude montre que les forêts de 28 parcs ont constitué des puits de carbone entre 1990 et 2020, tandis que les feux de forêt majeurs et les épidémies d'insectes ont fait de trois parcs des sources nettes. Les changements climatiques à l'échelle du Canada devraient accroître la gravité et la fréquence de ces perturbations et d'autres perturbations naturelles (p. ex., événements météorologiques extrêmes ou liés au climat), ce qui modifiera davantage la dynamique du carbone des écosystèmes et fera en sorte que plus de parcs deviendront des sources d'émissions lors de certaines années.

Compte tenu du niveau de détail présenté sur le plan spatial et temporel dans la présente étude, les constatations peuvent éclairer les décisions propres au parc concernant la conservation et la remise en état des écosystèmes dans les parcs nationaux, ainsi que d'autres décisions de gestion (p. ex., l'emplacement de nouveaux biens et infrastructures bâtis).

Les données et les renseignements obtenus dans le cadre de la présente étude et d'autres études semblables aideront à éclairer les discussions en cours sur les inventaires nationaux de carbone et les systèmes nécessaires pour appuyer la surveillance, la comptabilisation et la déclaration des émissions et des absorptions de gaz à effet de serre en vertu de diverses plateformes et protocoles, y compris la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC).



Photo : Scott Munn / ©Parcs Canada / Réserve de parc national des Îles-Gulf

Chapitre 1 : Introduction

La série de l'Atlas du carbone de Parcs Canada³ est la première analyse exhaustive de la quantité, de la répartition et de la dynamique du carbone naturel dans les parcs nationaux du Canada⁴. L'objectif de la série est d'estimer et de cartographier la quantité de carbone (C) stocké, séquestré et émis par les principaux types d'écosystèmes présents dans les parcs nationaux du Canada. En plus de fournir un aperçu du rôle des écosystèmes des parcs nationaux dans la dynamique du carbone, cette série fournira une comparaison de la dynamique du carbone entre les parcs et les écosystèmes terrestres partout au Canada. Ce premier rapport de la série, intitulé *Dynamique du carbone dans les forêts des parcs nationaux du Canada*, évalue les écosystèmes forestiers. Il a été préparé en collaboration avec le Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada. Les volumes suivants évalueront la dynamique du carbone d'autres principaux écosystèmes des parcs nationaux.

3 L'« Atlas » comprend la base de données numérique et les cartes des stocks de carbone et des émissions de GES qui sont accessibles sur le portail de données ouvertes du gouvernement du Canada avec le présent rapport.

4 Par souci de commodité, les termes « parcs » ou « parcs nationaux » sont utilisés dans le présent rapport lorsqu'ils font référence aux aires protégées étudiées dans le cadre du rapport de manière collective. Lorsqu'il est question d'une aire en particulier, la désignation appropriée est employée (parc national [PN], réserve de parc national [RPN], parc marin national [PMN]).

Agence Parcs Canada

Le mandat de l'Agence Parcs Canada consiste à protéger et à mettre en valeur des exemples représentatifs du patrimoine naturel et culturel du Canada, et à en favoriser chez le public la connaissance, l'appréciation et la jouissance, de manière à en assurer l'intégrité écologique et commémorative pour les générations d'aujourd'hui et de demain.

L'Agence est l'un des plus importants gestionnaires de terres de la Couronne, protégeant (à partir de 2020) plus de 450 000 km² de terres et d'eaux dans 47 parcs nationaux, cinq aires marines nationales de conservation qui protègent les écosystèmes marins, un parc urbain national et 171 lieux historiques nationaux, dont neuf canaux historiques. Le réseau d'aires protégées de Parcs Canada représente une diversité de régions et de paysages naturels, des parcs nationaux ayant été créés dans 31 des 39 régions terrestres du Canada.

Le réseau de parcs nationaux du Canada protège des exemples représentatifs exceptionnels des régions naturelles distinctes du pays, notamment les écosystèmes côtiers, marins, forestiers, des prairies, de la toundra, des tourbières, des terres humides et des eaux douces. En plus de protéger la biodiversité, de maintenir l'intégrité écologique et de fournir de l'eau, de l'air et des sols propres, les écosystèmes des parcs nationaux séquestrent également le gaz carbonique (CO₂) atmosphérique et permettent de le stocker dans les arbres, d'autres végétaux, la matière organique morte et les sols. En même temps, une partie de ce carbone est lentement rejetée dans l'atmosphère par la décomposition de la matière organique. En outre, les feux de forêt et d'autres perturbations naturelles, comme les épidémies d'insectes, causent des émissions rapides de CO₂ et de GES plus puissants comme le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O) dans l'atmosphère.

Les écosystèmes sont considérés comme un puits de carbone net lorsqu'ils séquestrent plus de carbone qu'ils n'en émettent, et comme une source de carbone lorsqu'ils émettent plus de carbone qu'ils n'en séquestrent à partir de l'atmosphère au cours d'une période donnée. La capacité des écosystèmes à réguler le climat par la séquestration et le stockage du carbone est un service écosystémique primordial et un élément crucial du cycle mondial du carbone. Il est essentiel de comprendre la dynamique du carbone des différents écosystèmes et les facteurs qui influent sur cette dynamique pour évaluer le bilan du carbone (puits et sources de carbone) d'une zone donnée et au fil du temps.

Pour ce qui est des écosystèmes terrestres, lorsque le carbone de l'atmosphère est séquestré, il est stocké dans différents réservoirs de carbone. Il existe cinq principaux réservoirs de carbone terrestre, soit la biomasse aérienne et souterraine (qui constituent ensemble le réservoir de la biomasse), la litière et le bois mort (aussi appelés réservoir de matière organique morte [MOM]) et la matière organique du sol (tableau 1) (GIEC, 2006).

Tableau 1. Description de cinq réservoirs de carbone de l'écosystème⁵ définis par le GIEC.

Réservoir		Description
Biomasse	Biomasse aérienne	Elle comprend tous les végétaux vivants et les formes ligneuses se trouvant au-dessus du sol (c.-à-d. les arbres, les arbustes, les herbes, les tiges, les souches, les branches et le feuillage).
	Biomasse souterraine	Elle comprend toute la biomasse des racines vivantes.
Matière organique morte (MOM)	Litière	Elle comprend toute la biomasse non vivante dont le diamètre est supérieur à la limite de la matière organique du sol (c.-à-d. 2 mm) et inférieur au diamètre minimal choisi pour le bois mort (c.-à-d. 10 cm) dans divers états de décomposition au-dessus ou à l'intérieur du sol minéral ou organique (p. ex., détritiques de feuilles, de fruits, de fleurs, de brindilles ou de petites branches).
	Bois mort	Il comprend tous les débris ligneux qui ne sont pas inclus dans le réservoir de litière et inclut tout le bois mort à la surface de la forêt, les arbres morts debout, les souches, les bûches mortes, les gros débris ligneux et les racines mortes dont le diamètre est égal ou supérieur à 10 cm.
Sols	Matière organique du sol	Elle inclut tout le carbone organique dans les sols minéraux à la profondeur de la limite du profil de sol choisie par le pays selon ses spécifications nationales. Les racines vivantes et mortes dont le diamètre est inférieur à la limite de la biomasse souterraine (c.-à-d. 2 mm) peuvent être incluses lorsqu'elles ne peuvent être distinguées de façon empirique.

Source : Tiré des lignes directrices du GIEC pour les inventaires de GES (GIEC, 2006).

Le carbone stocké dans ces différents réservoirs est appelé stock de carbone, défini comme la quantité de carbone dans un réservoir, habituellement mesurée en mégagrammes (ou en tonnes), et parfois déclarée comme densité de carbone mesurée en mégagrammes par hectare (Mg ha^{-1}) ou en tonnes par hectare (t/ha). Le carbone est transféré entre les réservoirs par des processus naturels, comme la chute de litière, et du réservoir à l'atmosphère par la décomposition et les perturbations (p. ex., feux de forêt). Ces transferts sont appelés flux de carbone. Les flux sont habituellement mesurés en mégagrammes par hectare par année ($\text{Mg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$), et la somme de tous les flux de carbone doit correspondre à tout changement des stocks de carbone au cours de la même période⁶.

5 Dans le présent rapport, sauf indication contraire, le terme « carbone de l'écosystème » désigne le carbone présent dans l'écosystème forestier.

6 Bien que cet énoncé soit vrai en ce qui concerne le carbone, y compris le carbone contenu dans le CO_2 gazeux, les émissions totales de GES sont mesurées en unités d'équivalent CO_2 et comprennent des quantités de CH_4 et de N_2O , qui ont des potentiels de réchauffement planétaire beaucoup plus élevés que le CO_2 (voir la section 2.4 ci-dessous). Pour cette raison, les émissions totales de GES peuvent dépasser les stocks de carbone disponibles dans un écosystème.

Différents écosystèmes stockent différentes quantités de carbone dans différents réservoirs, par unité de surface. Par exemple, les forêts pluviales côtières stockent la majorité de leur carbone dans la biomasse aérienne (p. ex., les arbres, les arbustes et d'autres végétaux), tandis que les tourbières stockent la majorité de leur carbone dans des couches profondes de sol organique (figure 1).

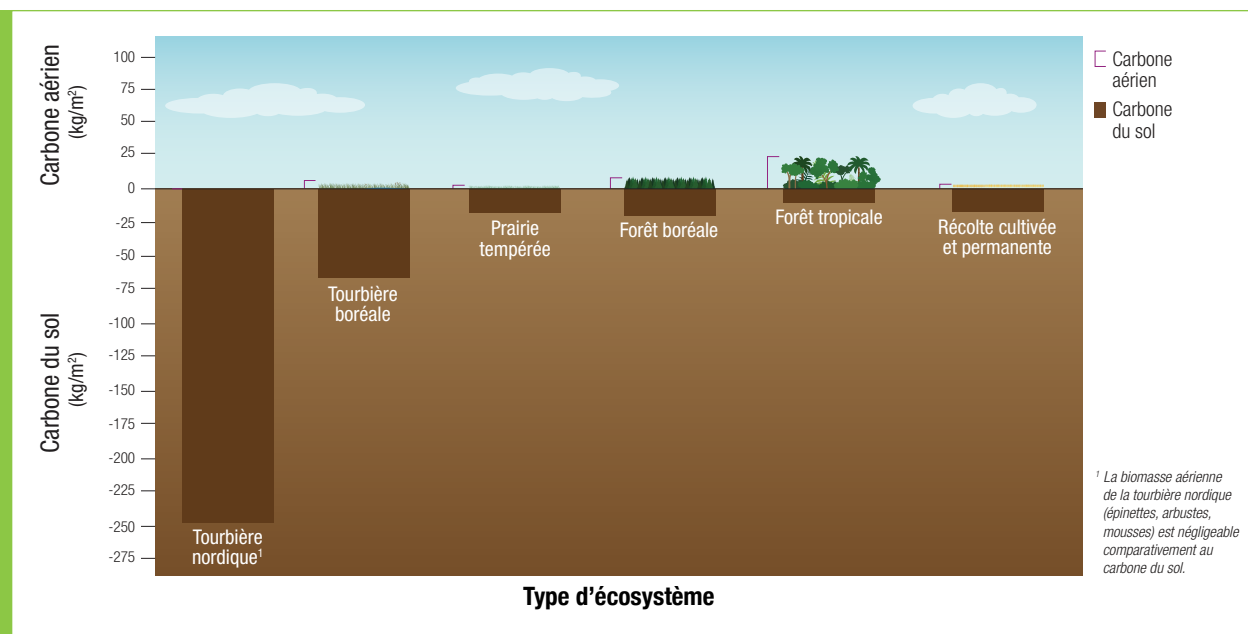


Figure 1. Carbone de la biomasse aérienne par rapport au carbone du sol, par type d'écosystème. Le carbone dans chaque réservoir est représenté par la densité de carbone (kg m^{-2}). Source : Tarnocai et coll., 2009 (tourbière nordique); Beaulne et coll., 2021 (tourbière boréale); Bremer et coll., 2008 (prairie tempérée); Stinson et coll., 2011 (forêt boréale); Amthor et coll., 1998 (forêt tropicale et récolte cultivée et permanente).

Le Canada compile et soumet chaque année des inventaires nationaux des sources et des puits de gaz à effet de serre à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Ces rapports d'inventaire national (RIN) comprennent le bilan de carbone, en tant que carbone net séquestré ou émis pour une zone donnée, pour les forêts aménagées et les terres agricoles, conformément aux méthodes et aux lignes directrices du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (p. ex., GIEC, 2003; GIEC, 2006). Aux fins des rapports de la CCNUCC, les « forêts aménagées » sont un sous-ensemble des forêts du Canada sous influence humaine directe, qui comprennent les forêts aménagées pour la récolte, les forêts sujettes à la gestion des incendies ou des dommages causés par les insectes, et certaines forêts protégées, comme dans les parcs nationaux et provinciaux, bien que cela varie selon la province et le territoire (figure 2). D'autres zones naturelles, y compris les forêts non aménagées, ne sont pas incluses dans ce rapport, même si elles jouent un rôle important dans le bilan de carbone du Canada et, en fin de compte, dans la réglementation des conditions climatiques locales et mondiales. Étant donné que les parcs nationaux du Canada appartiennent à la fois aux zones forestières « aménagées » et « non aménagées » aux fins de production de rapports, selon leur

emplacement, il n'existe aucune estimation systématique de la dynamique du carbone dans les parcs nationaux. La présente étude vise à combler cette lacune.

La série de l'Atlas du carbone est une contribution au programme de recherche en évolution du Canada sur le carbone et le climat (p. ex., ECCC, 2020). En plus de fournir des données scientifiques et des cartes pour aider les chercheurs, les gestionnaires et d'autres intervenants à comprendre et à visualiser les stocks et les dynamiques du carbone dans les parcs nationaux partout au pays, la série contribuera à éclairer les mesures de lutte contre les changements climatiques qui sont décrits dans le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques (CPC) et le Plan climatique renforcé de 2020 du Canada. Le CPC reconnaît le potentiel de stockage du carbone des écosystèmes et comprend des mesures visant à augmenter la quantité de carbone stocké en protégeant et en accroissant les puits de carbone dans les forêts, les terres humides, et d'autres écosystèmes.

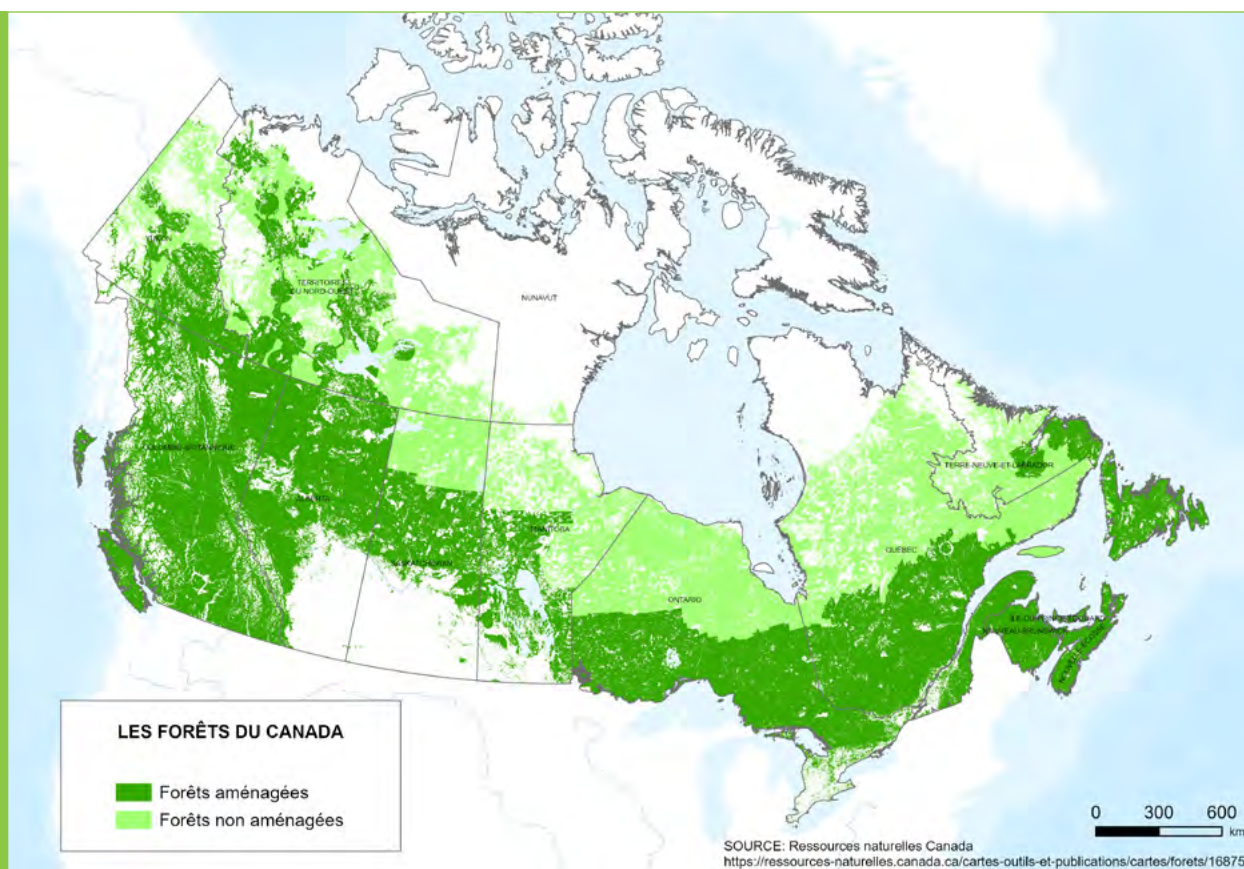


Figure 2. Étendue des forêts aménagées et non aménagées au Canada en 2017, telle que définie aux fins de l'estimation et de la déclaration des émissions et des absorptions de GES pour les éditions annuelles du Rapport d'inventaire national (RIN). Les zones vert pâle représentent les forêts non aménagées et les zones vert foncé représentent les forêts aménagées. Source : Ressources naturelles Canada.⁷

⁷ <https://ressources-naturelles.canada.ca/changements-climatiques/changements-climatiques/carbone-forestier/declaration-des-emissions-et-absorptions-de-gaz-effet-de-serre-provenant-des-forets-c/24188>

1.1 Carbone dans les parcs nationaux

Dans l'ensemble, Campbell et ses collaborateurs (2008) ont estimé que les parcs nationaux et les autres aires protégées dans le monde contiennent 312 gigatonnes (Gt) de carbone, ce qui représente 15,2 % du stock mondial de carbone terrestre. Plus récemment, Melillo et ses collaborateurs (2016) ont estimé que 238 Gt de carbone étaient stockés dans 15,5 millions de kilomètres carrés de terres désignées comme protégées dans la *World Database of Protected Areas* [base de données mondiale sur les aires protégées]⁸. De ce total, on estime que 92 Gt de carbone sont stockés dans la biomasse végétale et 146 Gt dans le sol, ce qui représente ensemble environ 12 % des stocks de carbone terrestre mondiaux. Melillo et ses collaborateurs (2016) ont également conclu que ces aires protégées terrestres constituaient un puits de carbone, absorbant environ 0,5 Gt de carbone de l'atmosphère chaque année.

Au Canada, les études antérieures qui ont évalué le carbone dans les parcs nationaux ou d'autres aires protégées étaient limitées à certaines régions ou provinces (p. ex., Morton et coll., 2007; Sharma et coll., 2013). Kulshreshtha et ses collaborateurs (2000) ont étudié la valeur économique de la séquestration du carbone dans 39 parcs nationaux. Ils ont estimé que ces parcs contiennent 4,43 Gt de carbone dans divers réservoirs, dont environ la moitié est stockée dans les tourbières nordiques et près de la moitié dans les sols des forêts et des prairies. Leurs estimations de la biomasse aérienne étaient toutefois incomplètes et fondées sur des données secondaires sur la couverture terrestre plutôt que sur des inventaires forestiers. Les progrès récents des données sur la couverture terrestre et de la modélisation du carbone réalisée à partir d'inventaires forestiers détaillés ont considérablement amélioré la capacité d'estimer le carbone de la biomasse aérienne et souterraine. Les estimations des stocks de carbone dans le présent Atlas sont fondées sur des modèles et des données qui ont bénéficié de ces récentes avancées.

1.2 Dynamique du carbone dans les écosystèmes forestiers

Les forêts jouent un rôle majeur dans le cycle du carbone. Le Quéré et ses collaborateurs (2015) ont conclu que, à l'échelle mondiale, les forêts constituent le plus grand puits de carbone terrestre et qu'au cours des deux dernières décennies, elles ont absorbé plus du quart des émissions mondiales provenant de la combustion de combustibles fossiles (voir aussi Le Quéré et coll., 2015; Pan et coll., 2011). Les forêts font naturellement circuler le carbone entre l'atmosphère et les réservoirs de carbone de l'écosystème par la photosynthèse, la respiration et la décomposition, et les perturbations périodiques comme les incendies et des épidémies d'insectes. Le carbone de l'atmosphère est séquestré par photosynthèse, et une partie de ce qui est absorbé est convertie en productivité primaire (croissance). Le taux de photosynthèse est largement déterminé par la productivité de l'aire protégée (y compris les facteurs climatiques et

8 <https://www.protectedplanet.net/c/world-database-on-protected-areas> [en anglais seulement]

environnementaux), la composition des espèces et l'âge de la végétation. Une partie du carbone est émise par la végétation vivante dans l'atmosphère par l'intermédiaire de la respiration autotrophe (R_a).

À mesure que la végétation meurt, le carbone est transféré dans la matière organique morte (MOM). Le carbone de cette MOM est soit transformé en matière organique du sol, soit rejeté dans l'atmosphère par la décomposition. De plus, les forêts sont touchées par des perturbations naturelles et anthropiques qui affectent les stocks de carbone et entraînent un transfert de carbone entre les réservoirs. Par exemple, les feux de forêt libèrent du carbone dans l'atmosphère directement à partir de la biomasse vivante et des réservoirs de MOM, et contribuent au réservoir de litière par la mortalité des arbres, immédiatement ou au fil du temps. Les épidémies d'insectes réduisent la croissance des arbres et peuvent également causer la mortalité. Lorsque les forêts sont exploitées, une partie du carbone contenu dans la biomasse est transférée aux produits du bois récoltés; de là, il peut être perdu dans l'atmosphère (p. ex., combustion pour la bioénergie) ou stocké pendant quelques années à plusieurs décennies (p. ex., dans le papier ou dans les bâtiments) (GIEC, 2006).

Les forêts du Canada couvrent 347 millions d'hectares de terres et représentent environ 9 % de la superficie forestière mondiale⁹. Pendant la majeure partie du siècle dernier, les forêts aménagées du Canada (environ 230 millions d'hectares) ont constitué un important puits de carbone. Au cours des dernières décennies, cependant, la situation s'est inversée certaines années en raison, en grande partie, d'une augmentation importante de la superficie totale annuelle brûlée par les feux de forêt et par d'importantes épidémies d'insectes dans certaines régions. De plus, la demande économique pour les produits du bois récoltés a changé au fil des ans, ce qui a influé sur les taux de récolte¹⁰. La combinaison de ces facteurs a fait en sorte que les forêts aménagées du Canada constituent maintenant une source nette de gaz à effet de serre (figure 3)¹¹.

9 <https://d1ied5g1xfqpx8.cloudfront.net/pdfs/40085.pdf>

10 <https://ressources-naturelles.canada.ca/changements-climatiques/changements-climatiques/carbone-forestier/13086>

11 <https://ressources-naturelles.canada.ca/changements-climatiques/changements-climatiques/carbone-forestier/13086>

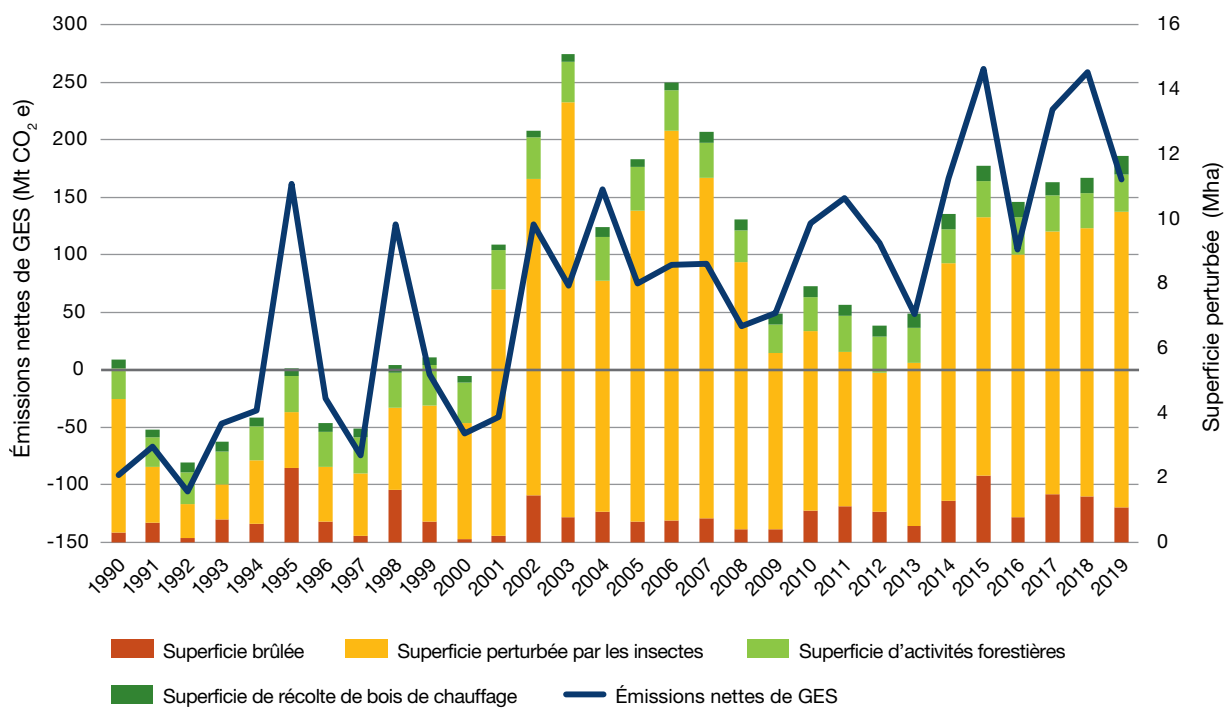


Figure 3. Émissions annuelles nettes de carbone et zones touchées par les perturbations naturelles dans les forêts aménagées du Canada : de 1990 à 2019. Source : Rapport d’inventaire national 1990-2019.



Photo : Éric Le Bel / ©Parcs Canada / Parc national Forillon

Chapitre 2 : Données et méthodes

L'Agence Parcs Canada administre actuellement 47 parcs nationaux et un parc urbain national. Trente-huit de ces parcs comptent 10 % ou plus de leur zone géographique qui est classée comme étant constituée de forêts (figure 4)¹². Nous n'avons pas suffisamment de données de l'inventaire forestier et sur les perturbations naturelles concernant 7 de ces 38 parcs pour en tenir compte dans notre étude. Le tableau 2 et la figure 4 présentent, respectivement, les détails relatifs à chacun des 31 parcs examinés dans cet Atlas et leurs emplacements. Les forêts de ces 31 parcs couvrent 56 000 km², soit 63 % de la superficie totale de ces parcs.

12 Les 11 parcs dont moins de 10 % de la superficie est constituée de forêts sont les suivants : PN Aulavik, PN Auyuittuq, PN des Prairies, PN Ivavik, PN Gausuittuq, PN Quttinirpaaq, RPN de l'Île-de-Sable, PN Sirmilik, PN des Monts-Torngat, PN Tuktut Nogait et PN Ukkusuksalik.

Tableau 2. Couvert forestier dans 31 parcs nationaux dont 10 % ou plus de la superficie est constituée de forêts, regroupés par écozone.

Écozone	Nom du parc	Province	Superficie géographique (km ²)	Superficie forestière (km ²)	Superficie forestière (%)
Maritime de l'Atlantique	PN des Hautes-Terres-du-Cap-Breton	N.-É.	971,7	621,3	64
	PN Forillon	Qc	247,6	234,0	95
	PN Fundy	N.-B.	211,8	194,7	92
	PN et LHN Kejimikujik	N.-É.	421,9	308,5	73
	PN Kouchibouguac	N.-B.	242,7	122,7	51
	PN de l'Île-du-Prince-Édouard	Î.-P.-É.	35,7	7,1	20
Plaines boréales	PN de Prince Albert	Sask.	3 882,4	3 462,3	89
	PN du Mont-Riding	Man.	3 077,2	2 385,7	78
	PN Wood Buffalo ¹³	Alb.	44 236,0	32 870,6	74
Bouclier boréal	PN des Îles-de-la-Baie-Georgienne	Ont.	14,0	9,8	70
	PN du Gros-Morne	T.-N.-L.	1 811,6	441,8	24
	PN de la Mauricie	Qc	547,0	473,2	87
	RPN de l'Archipel-de-Mingan	Qc	96,2	42,4	44
	PN Pukaskwa	Ont.	1 869,0	1 683,0	90
	PN Terra-Nova	T.-N.-L.	408,4	204,5	50
Plaines à forêts mixtes	PN de la Péninsule-Bruce	Ont.	161,4	132,1	82
	PMN Fathom Five	Ont.	117,1	13,4	11
	PN de la Pointe-Pelée	Ont.	16,0	2,4	15
	PUN de la Rouge	Ont.	79,2	18,9	24
	PN des Mille-Îles	Ont.	25,6	13,7	54
Cordillère montagnarde	PN Banff	Alb.	6 846,5	3 216,0	47
	PN des Glaciers	C.-B.	1 344,6	378,9	28
	PN Jasper	Alb.	11 079,0	5 691,9	51
	PN Kootenay	C.-B.	1 373,5	820,2	60
	PN du Mont-Revelstoke	C.-B.	261,7	169,1	65
	PN des Lacs-Waterton	Alb.	501,9	341,5	68
	PN Yoho	C.-B.	1 280,1	663,0	52

13 Le PN Wood Buffalo s'étend sur deux écozones – les plaines boréales et les plaines de la taïga – mais aux fins de production de rapport, il est considéré ici comme étant situé dans l'écozone des plaines boréales seulement.

Écozone	Nom du parc	Province	Superficie géographique (km ²)	Superficie forestière (km ²)	Superficie forestière (%)
Maritime du Pacifique	RPN des Îles-Gulf	C.-B.	37,3	26,5	71
	RPN et site du patrimoine haïda Gwaii Haanas	C.-B.	1 456,3	1 428,4	98
	RPN Pacific Rim	C.-B.	519,3	270,5	52
Prairies	PN Elk Island	Alb.	189,8	121,0	64
TOTAL		Canada	83 362,5	56 369,1	67

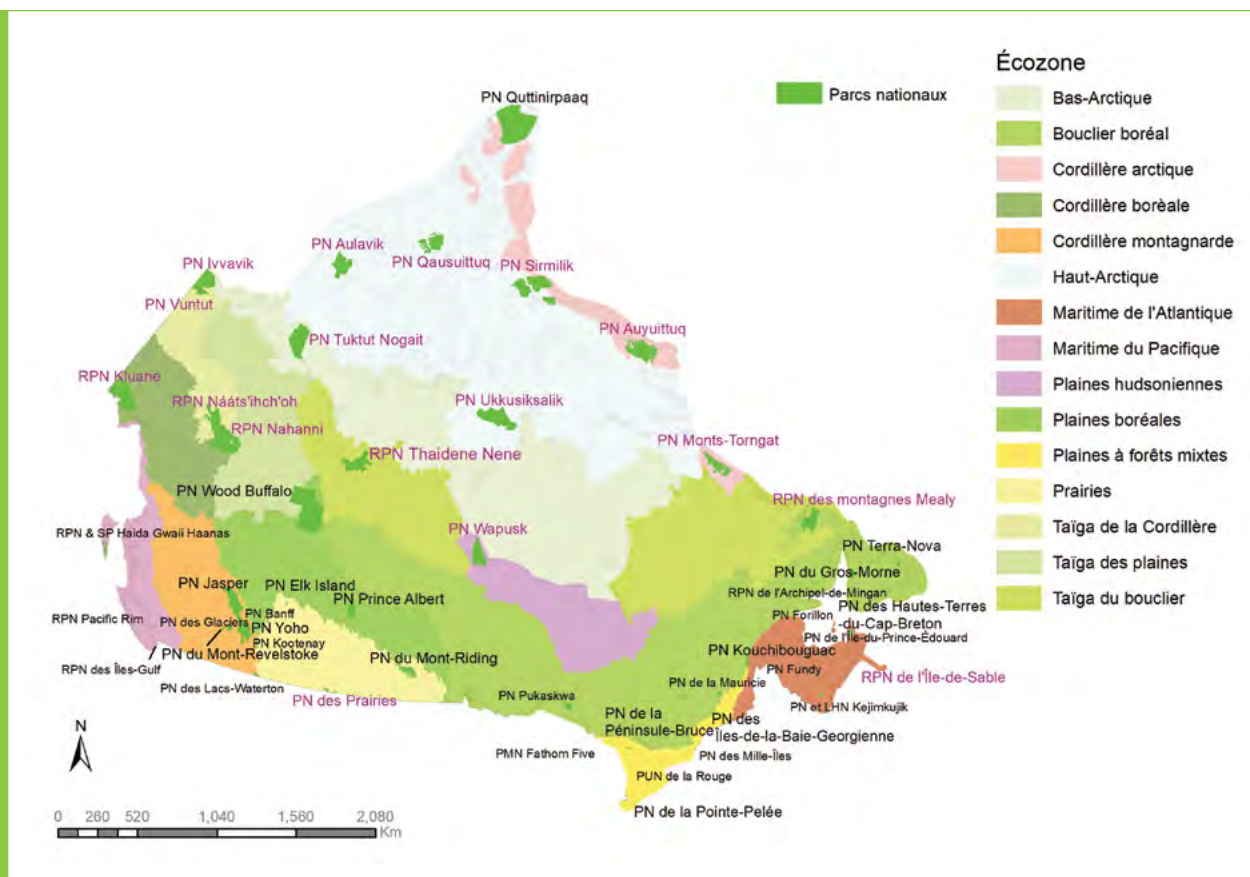


Figure 4. Répartition des parcs nationaux ayant 10 % ou plus de leur superficie représentée par des écosystèmes forestiers dans les écozones du Canada. Les parcs indiqués en noir ont été évalués, et les parcs indiqués rose n'ont pas été évalués dans le cadre de la présente étude.

2.1 Plateforme de modélisation

Deux types de modèles peuvent être utilisés pour estimer la dynamique du carbone forestier, soit les *modèles fondés sur les processus* qui simulent le processus de photosynthèse (p. ex., 3-PG, Landsberg et Waring, 1997; BIOME-BGC, Running et Gower, 1991; CENTURY, Metherell et coll., 1993; TEM, Tian et coll., 1999); et les *modèles empiriques* qui utilisent des courbes de rendement et des données d'inventaire sur le terrain (p. ex., EFISCEN, Nabuurs et coll., 2000; CO2FIX, Masera et coll., 2003; MBC-SFC3, Kurz et coll., 2009).

Les modèles fondés sur les processus nécessitent des données détaillées sur de nombreuses conditions environnementales, qui n'étaient pas disponibles à l'échelle spatiale nécessaire pour cette étude. Nous avons donc utilisé le Modèle générique du bilan du carbone (MGBC), qui est une version spatialement explicite du Modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien (MBC-SFC3) (Kurz et coll., 2009) et qui a été élaboré en collaboration avec *Moja Global*¹⁴. Le MGBC utilise une combinaison de données spatiales de l'inventaire forestier, de données de température annuelle moyenne régionale, de l'emplacement et de l'étendue des perturbations forestières, ainsi que des paramètres de modélisation non spatiaux ou grossièrement référencés spatialement (p. ex., courbes de rendement, coefficients de volume à biomasse), pour estimer le bilan annuel de carbone d'une zone d'étude (figure 5).

Fait important, le MGBC est conforme aux lignes directrices du GIEC pour la production de rapports sur les stocks et les flux de carbone provenant de l'affectation des terres, des changements d'affectation des terres et de la foresterie (GIEC, 2006). Il s'agit de la composante principale du Système national de surveillance, de comptabilisation et de production de rapports concernant le carbone des forêts (SNSCPRCF) (Kurz & Apps, 2006) du Canada, et il est utilisé par le Canada pour rendre compte annuellement de ses émissions et des absorptions de GES pour le secteur forestier (ECCC, 2020).

14 <http://moja.global> [en anglais seulement]

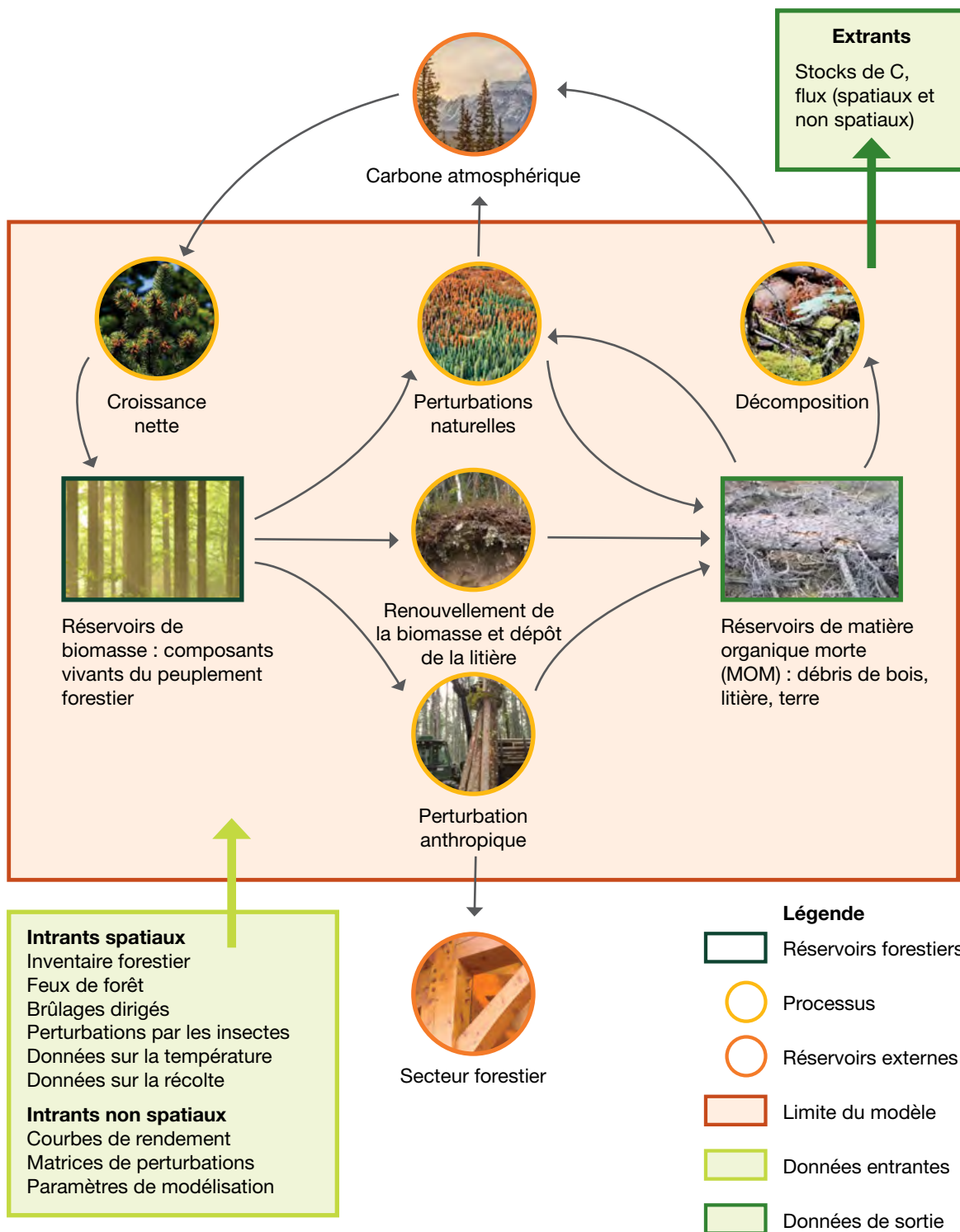


Figure 5. Schéma du Modèle générique du bilan du carbone (MGBC) montrant les entrées et les sorties du modèle, ainsi que les processus simulés. Adapté de Kurz et coll., (2009). Le sort du carbone dans les produits du bois récoltés n'est pas inclus, étant donné qu'il n'y a pratiquement aucune récolte dans les parcs nationaux.

Le MGBC simule la dynamique du carbone dans et entre dix réservoirs de biomasse et onze réservoirs de MOM¹⁵ (Kurz et coll., 1996), produisant des représentations spatialement explicites des stocks et des flux de carbone. Le modèle suit les stocks de carbone, les transferts entre les réservoirs et de nombreuses autres mesures du flux de carbone, comme la productivité primaire nette (PPN), la respiration hétérotrophe (R_h), la productivité nette de l'écosystème (PNE), la productivité nette du biome (PNB), et les émissions de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4) et d'oxyde nitreux (N_2O) par pas de temps annuels. Les stocks et les flux de carbone sont également suivis par événements perturbateurs (p. ex., feux de forêt et épidémies d'insectes).

Les stocks et les flux de carbone dans les 31 parcs nationaux ont été estimés entre 1990 et 2020. L'année 1990 marque le début de la période de déclaration des émissions et des absorptions de carbone en vertu de la CCNUCC, et 2020 est l'année pour laquelle les données les plus récentes sont disponibles. Les effets des perturbations naturelles (c.-à-d. les feux de forêt et les épidémies d'insectes) et des perturbations anthropiques (c.-à-d. les brûlages dirigés) sur les stocks et les flux de carbone ont été estimés séparément à l'aide des données propres au parc obtenues du personnel du parc et d'autres sources (section 2.2.2). La résolution spatiale utilisée dans cette étude était d'environ 30 x 30 m, car les données spatiales disponibles étaient compatibles à cette échelle. Cette résolution a également permis de saisir les répercussions des perturbations de plus petite taille, comme les petits brûlages dirigés dans les parcs, qui ne couvrent souvent que quelques hectares.

15 Le GIEC définit les sols comme un réservoir de carbone de l'écosystème distinct (tableau 1), tandis que le MGBC combine les sols, le bois mort et la litière dans le réservoir de MOM.

2.2 Données spatiales

2.2.1 Données de l'inventaire forestier

Les données spatiales de l'inventaire forestier recueillies dans le cadre des programmes de surveillance des parcs et d'autres études ont été acquises et compilées pour les simulations. Dans les cas où il n'y avait pas de données d'inventaire disponibles pour un parc, ces données ont été obtenues de la province ou créées à l'aide d'autres ensembles de données, comme les données de classification écologique des terres ou la classification de la couverture terrestre par télédétection.

Les couches de l'inventaire forestier fournissent au MGBC les conditions initiales des peuplements forestiers (c.-à-d. l'âge, les espèces, les types de forêts) et les « classificateurs » (p. ex., indice du site, propriété, principales espèces) qui sont utilisés pour coupler les données de l'inventaire aux courbes de rendement pour chaque unité spatiale.

Le MGBC exige des renseignements sur l'âge initial des peuplements forestiers pour l'année de début de la simulation. Pour les zones perturbées par des feux de forêt, l'âge des peuplements forestiers provenant des données de l'inventaire forestier n'était pas toujours compatible avec la date d'un feu de forêt connu dans une zone donnée. Étant donné que Parcs Canada surveille et cartographie tous les feux de forêt dans les parcs nationaux chaque année, l'âge des peuplements forestiers en fonction de l'historique des incendies de l'Agence a été considéré comme plus précis et a donc été utilisé dans la simulation du MGBC plutôt que l'âge des incendies estimé à partir des données de l'inventaire.

En 1990, le calcul de l'âge initial des peuplements forestiers était fondé sur l'époque de l'inventaire (tableau 3). Par exemple, si un peuplement avait 25 ans dans un inventaire réalisé en 2010, son âge en 1990 a été fixé à 5 ans. Lorsque le peuplement était plus jeune que le nombre d'années entre 1990 et l'époque de l'inventaire, l'âge a été établi à l'aide d'une ou de plusieurs des approches suivantes :

- 1) Les données disponibles avant 1990 sur les perturbations de remplacement des peuplements (comme les feux de forêt) ont servi à attribuer l'âge en 1990. Par exemple, si le dernier feu de forêt avant 1990 s'est produit en 1950, l'âge a été fixé à 40 ans en 1990.
- 2) Pour les zones non perturbées, l'analyse de proximité spatiale a été employée pour l'estimation de l'âge, et l'âge moyen des peuplements voisins a été attribué aux peuplements « d'âge manquant ». Cette approche a été utilisée pour assurer la continuité géographique, car les arbres près d'une zone perturbée ont généralement le même âge que les arbres touchés. L'analyse de proximité a été effectuée à l'aide du logiciel ESRI ArcGIS 10.x.

Dans les cas où l'inventaire ne contenait aucun renseignement sur l'âge, les données sur les perturbations causées par les feux de forêt ont servi à attribuer l'âge aux zones perturbées. Pour les régions non perturbées, d'autres produits, comme la classification de la couverture terrestre par télédétection ou les grandes catégories d'âge disponibles auprès d'autres sources, ont été utilisés.

2.2.2 Perturbations

Les données sur les perturbations causées par les feux de forêt, les brûlages dirigés, divers insectes et la récolte ont été compilées à partir de diverses sources (tableau 3). Le MGBC relie l'information sur l'année, le type et l'intensité des perturbations à une matrice des perturbations (Kurz et coll., 2009) qui définit les flux de carbone propres aux perturbations entre les différents réservoirs et l'atmosphère, selon le type de gaz.

Feux de forêt et brûlages dirigés

Des feux de forêt se sont produits dans 17 parcs nationaux, à des fréquences et à une étendue variables, au cours de la période de l'étude. D'autres parcs nationaux, surtout dans l'est du Canada, n'ont pas été touchés par des feux pendant cette période. Les données spatiales sur l'occurrence des feux de forêt ont été compilées à partir des renseignements disponibles dans chaque parc. Afin de s'assurer que tous les feux de forêt étaient inclus, une comparaison a été effectuée avec les données d'autres sources, comme le produit « Composite2Change » pour 1984-2012 (Hermosilla et coll., 2016) et les données de la Composite nationale des superficies brûlées disponibles auprès de Ressources naturelles Canada¹⁶. Les feux manquants, le cas échéant, ont été ajoutés aux données sur les feux des ensembles de données propres au parc. Dans les simulations, tous les feux de forêt ont été considérés comme des événements de remplacement de peuplement.

Parcs Canada effectue des brûlages dirigés dans les parcs pour aider à maintenir l'intégrité écologique et la biodiversité, à promouvoir la conservation et la remise en état des écosystèmes et à réduire le risque de feux de forêt pour les collectivités avoisinantes. Au cours de la période de l'étude allant de 1990 à 2020, des brûlages dirigés ont été effectués dans plus de la moitié des 31 parcs nationaux étudiés. Les données spatiales sur les brûlages dirigés ont été obtenues directement des parcs pertinents. Étant donné que les données sur les objectifs et l'importance des brûlages dirigés n'étaient pas facilement disponibles, on a supposé, pour la simulation, que 50 % de la zone de brûlage dirigé avait été touchée par un feu de surface et l'autre 50 % par un feu de cime.

¹⁶ <https://cwffis.cfs.nrcan.gc.ca/mini-entrepot>

Épidémies d'insectes

Dans les simulations du MGBC, les effets de la perturbation de 13 espèces d'insectes ont été pris en compte, soit le dendroctone du pin ponderosa (DPP), le dendroctone du Douglas (DSD), le scolyte du sapin de l'Ouest (SSO), la tordeuse à tête noire de l'Ouest (TTNO), le dendroctone du mélèze (DM), la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE), la tordeuse bisannuelle de l'épinette (TBAE), l'arpenreuse de la pruche (AP), l'agrile du frêne (AF), la livrée des forêts (LF), la tordeuse du tremble (TT), la noctuelle décolorée (ND) et la spongieuse européenne (SE) (l'**annexe A** fournit le nom scientifique de chaque insecte forestier). Des données spatialement explicites sur l'étendue et la gravité de ces épidémies d'insectes ont été compilées à partir des ensembles de données des relevés provinciaux sur la santé des forêts.

Les relevés aériens annuels des insectes ne sont jamais terminés à 100 % (surtout dans les grands parcs comme le parc national Wood Buffalo) en raison de la mauvaise visibilité causée par la fumée des feux de forêt et les conditions météorologiques défavorables. Dans certains cas, les relevés n'ont pas été menés depuis quelques années. Dans ces cas, toutes les données disponibles des relevés provinciaux effectués dans le parc ont été utilisées, même si elles ne couvraient pas tout le parc. Pour certains parcs (p. ex., PN des Hautes-Terres-du-Cap-Breton), les données sur la santé des forêts n'étaient pas disponibles en format spatial, de sorte que les perturbations causées par les insectes n'ont pas été intégrées aux simulations pour ces parcs.

Épidémie de dendroctone du pin ponderosa dans le parc national Jasper, où des arbres récemment tués arborent un feuillage rouge. (Crédit photo : Chris Maundrell, mars 2019).



Tableau 3. Inventaire forestier et données sur les perturbations utilisées dans les simulations du MGBC.

Écozone	Nom du parc	Année d'inventaire	Insectes ¹		Feux de forêt		Brûlages dirigés		
			Type d'insecte	Années	Source	Années	Source	Années	Source
Maritime de l'Atlantique	PN des Hautes-Terres-du-Cap-Breton	2014	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	2012	PC	--	--
	PN Forillon	2004	AP, TBE	1995-2020	Québec	--	--	1990-2020	PC
	PN Fundy	2003	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	1995-2020	PC	--	--
	PN et LHN Kejimikujik	2014	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	2016-2020	PC	--	--
	PN Kouchibouguac	2002	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	1992	PC	--	--
Plaines boréales	PN de l'Île-du-Prince-Édouard	2010	SE	2014-2017	Î.-P.-É.	--	--	--	--
	PN de Prince Albert	2016	DM, LF, TBE	1994-2020	Saskatchewan	1995-2020	PC	1990-2020	PC
	PN du Mont-Riding	2016	LF, TBE	2016-2020	Manitoba	1990-2020	PC	1995-2020	PC
	PN Wood Buffalo	1975, 2000	SSO, LF, TT, DPP, TBE, TBAE	1990-2019	SCF	1990-2020	PC	1990-2020;	PC
	PN des Îles-de-la-Baie-Georgienne	2009	AF, TBE, LF	1990-2015	Ontario	--	--	--	--
Bouclier boréal	PN du Gros-Morne	2010	AP, TBE	1994-2009, 2020	Terre-Neuve-et-Labrador	1990-2020	PC	--	--
	PN de la Mauricie	2008	AP, TBE	1995-2020	Québec	1990-2020	PC	1991-2020	PC
	RPN de l'Archipel-de-Mingan	2002	AP, TBE	1995-2020	Québec	2013	PC	--	--
	PN Pukaskwa	2008	ND, LF, AF, TBE	1990-2015	Ontario	1990-2020	PC	1995-2020	PC
	PN Terra-Nova	2010	AP, TBE	1995	Terre-Neuve-et-Labrador	1996-2020	PC	2009-2020	PC

Écozone	Nom du parc	Année d'inventaire	Insectes ¹		Feux de forêt		Brûlages dirigés	
			Type d'insecte	Années	Source	Années	Source	Années
Plaines à forêts mixtes	PN de la Péninsule-Bruce	1978, 2006	ND, AF	1990-2015	Ontario	--	--	--
	PMN Fathom Five	2009	AF	1990-2015	Ontario	--	--	--
	PN de la Pointe-Pelée	2004	AF, TBE	1990-2015	Ontario	2017	PC	--
	PUN de la Rouge	2009, 2014	SE	2008	Ontario	--	--	--
	PN des Mille-Îles	2006	AF, TBE	1990-2015	Ontario	--	1995-2020	PC
Cordillère montagnarde	PN Banff	2017	SSO, LF, TT, DPP, TBE, TBAE	1990-2020	SCF	1990-2020	PC	PC
	PN des Glaciers	2015	DPP, SSO, DSD, TTNO	1990-2020	Colombie-Britannique	1990-2020	PC	PC
	PN Jasper	2012	SSO, LF, TT, DPP, TBE, TBAE	1990-2020	SCF	1990-2020	PC	PC
	PN Kootenay	2015	DPP, SSO, DSD, TTNO	1990-2020	Colombie-Britannique	1990-2020	PC	PC
	PN du Mont-Revelstoke	2015	DPP, SSO, DSD, TTNO	1990-2020	Colombie-Britannique	1990-2020	PC	PC
	PN des Lacs-Waterton	2012	SSO, LF, TT, DPP, TBE, TBAE	1990-2020	SCF	1990-2020	PC	PC
	PN Yoho	2015	DPP, SSO, DSD, TTNO	1990-2020	Colombie-Britannique	1990-2020	PC	PC
Maritime du Pacifique	RPN des Îles-Gulf	2006	DPP, SSO, DSD, TTNO	1990-2020	Colombie-Britannique	1990-2020	PC	PC
	RPN et site du patrimoine haïda Gwaii Haanas	2015	DPP, SSO, DSD, TTNO	1990-2020	Colombie-Britannique	1990-2020	PC	PC
	RPN Pacific Rim	2015	DPP, SSO, DSD, TTNO	1990-2020	Colombie-Britannique	1990-2020	PC	PC
Prairies	PN Elk Island	1995	SSO, LF, TT, DPP, TBE, TBAE	1990-2020	SCF	1990-2020	PC	PC

Remarque : -- représente l'absence de perturbation;

¹ Les types d'insectes considérés sont répertoriés par province; ce ne sont pas tous les insectes répertoriés pour un parc qui se trouvent dans ce parc.

Récolte

En général, la récolte est interdite dans les parcs nationaux. Le parc national du Gros-Morne est une exception où les résidents admissibles sont autorisés à récolter du bois de chauffage et à scier des bûches à des fins domestiques¹⁷. Les données pour tout le bois récolté étaient disponibles et utilisées dans la simulation pour tenir compte de cet usage domestique. Il y a eu des activités d'exploitation forestière commerciale dans le parc national Wood Buffalo jusqu'en 1991, mais aucune donnée spatiale ou volumétrique sur les récoltes n'a pu être incluse dans la simulation. Par conséquent, les estimations de l'âge des peuplements forestiers ont été obtenues à partir des données d'inventaire de 2000 pour ce parc.

Dans quelques parcs nationaux analysés, de petites quantités d'arbres ont été récoltées à des fins de gestion des combustibles et de restauration des forêts. Cependant, la taille de ces zones récoltées, qui n'étaient pas coupées à blanc, était négligeable par rapport à la superficie forestière totale de ces parcs, et, par conséquent, l'incidence de cette récolte sur la dynamique du carbone n'a pas été incluse dans les simulations.

2.3 Données non spatiales

2.3.1 Courbes de rendement

Les courbes de rendement indiquent le volume d'un peuplement forestier à un âge particulier, habituellement à des intervalles de 5 ou 10 ans (figure 6). Le MGBC convertit les courbes périodiques basées sur le volume en incréments de carbone annuels en utilisant un ensemble d'équations de volume à biomasse et un algorithme de lissage pour combler le manque d'information pour les jeunes peuplements sans arbres de taille marchande (Kurz et coll., 2009).

Les courbes de rendement utilisées pour les parcs dans les simulations du MGBC ont été obtenues auprès des organismes provinciaux respectifs pour tous les parcs à l'étude, sauf le parc national du Gros-Morne, où des tableaux de volume et des courbes de rendement étaient disponibles expressément pour les blocs de récoltes domestiques dans le parc.

17 <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/DORS-2005-204/page-1.html>

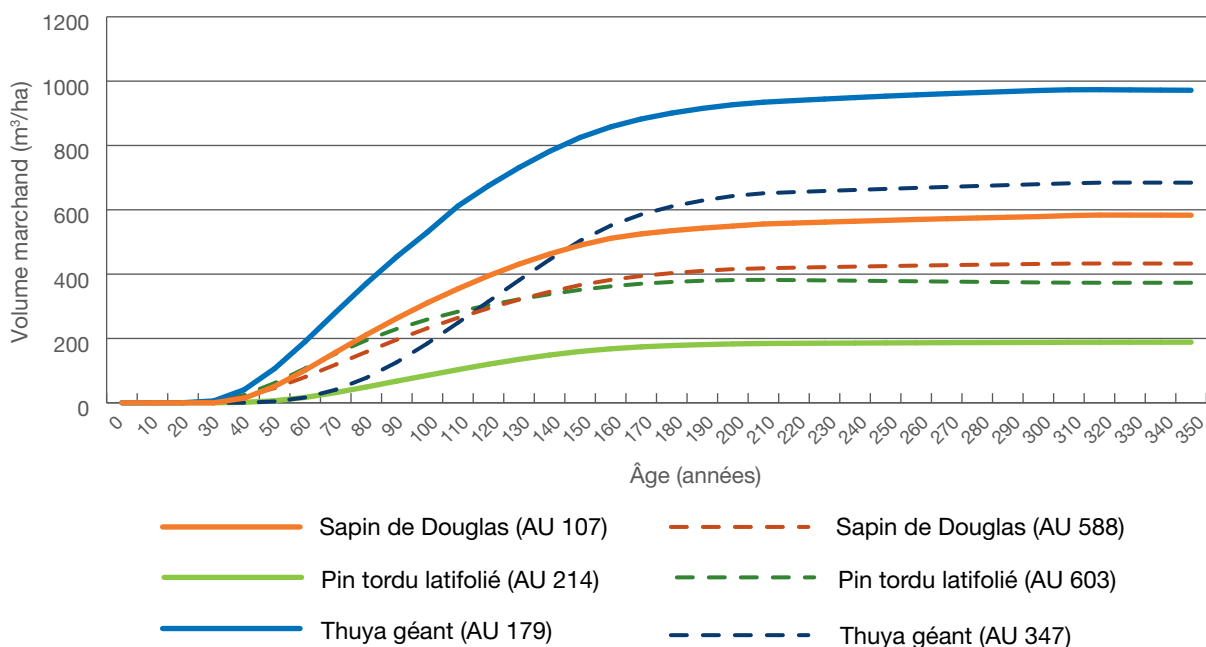


Figure 6. Illustration des courbes de rendement pour le volume de bois d'œuvre marchand pour les espèces dans différentes unités d'analyse (UA) en Colombie-Britannique. Les lignes continues représentent les courbes des espèces de l'écozone maritime du Pacifique et les courbes pointillées représentent les espèces correspondantes de l'écozone de la cordillère montagnarde.

2.3.2 Matrices des perturbations

Les matrices des perturbations (MP) définissent les flux entre les réservoirs de carbone dans le système résultant d'une perturbation, par exemple, la biomasse de résineux vivants jusqu'aux chicots (Kurz et coll., 2009). Les matrices des perturbations utilisées dans cette étude proviennent de l'ensemble de normes inclus dans le MGBC, ainsi que de nouvelles matrices élaborées par les auteurs pour certains insectes (p. ex., le scolyte du sapin de l'Ouest, le dendroctone du Douglas) et les types de feux (p. ex., les brûlages dirigés) qui ne sont pas déjà représentés. L'élaboration de nouvelles MP impliquait la modification de la MP existante du type de perturbation dont les répercussions ressemblaient le plus à la nouvelle perturbation. Cette modification était fondée sur des connaissances spécialisées et la littérature. Par exemple, la MP pour le brûlage dirigé a été élaborée en modifiant les facteurs de flux dans la MP des feux de forêt. L'**annexe B** présente deux exemples de matrices des perturbations pour le dendroctone du pin ponderosa (très grave) et les brûlages dirigés (cime).

2.4 Analyse

Des sorties spatiales et non spatiales ont été générées à des pas de temps annuels pour la période d'étude de 31 ans pour les paramètres de carbone suivants : les stocks de carbone dans les réservoirs définis par le GIEC (c.-à-d. la biomasse aérienne, la biomasse souterraine, le bois mort, la litière et le sol); le carbone total de l'écosystème dans chaque réservoir; la productivité primaire nette (PPN); la respiration hétérotrophe (R_h); la productivité nette de l'écosystème (PNE); la productivité nette du biome (PNB); les émissions et absorptions de gaz à effet de serre (GES)¹⁸. Les émissions de GES comprenaient les émissions de CO_2 , de CO, de CH_4 et de N_2O et ont été converties en équivalents de CO_2 (éq. CO_2) à l'aide des estimations du potentiel de réchauffement planétaire (PRP) sur 100 ans pour chaque GES provenant du Quatrième rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2007). La variabilité interannuelle des conditions météorologiques, qui a une incidence sur les taux de croissance et de décomposition, n'a pas été prise en compte dans ces analyses.

Les résultats de chaque paramètre ont été agrégés à l'échelle du parc, de l'écozone ainsi qu'à l'échelle nationale pour l'ensemble des 31 parcs. Nous avons évalué les effets potentiels de l'autocorrélation spatiale et temporelle entre les parcs et dans la série chronologique à l'aide du test de l'indice de Moran (Moran, 1950) et du test de Durbin-Watson (Durbin & Watson, 1971), respectivement.

¹⁸ Voir le glossaire pour connaître la définition de ces termes.



Photo : Dale Wilson / ©Parcs Canada / Parc national Fundy

Chapitre 3 : Résultats

La présente étude fournit les premières estimations exhaustives des stocks, des densités et des flux de carbone au fil du temps pour les écosystèmes forestiers des parcs nationaux du Canada. Le chapitre suivant décrit en détail les stocks de carbone dans les forêts des parcs nationaux, leurs changements entre 1990 et 2020 en raison des processus et des perturbations des écosystèmes naturels, et les émissions globales de gaz à effet de serre associées à ces dynamiques. Des similitudes et des différences notables dans les tendances annuelles et sur 31 ans observées entre les réservoirs de carbone, les parcs et les écozones sont illustrées par des exemples clés de l'étude.

3.1 Stocks et densité de carbone

Le stock moyen de carbone contenu dans les 31 parcs nationaux pendant la période de l'étude était de 1452 ± 11 Mt C (tableau 4). La densité moyenne de carbone de l'écosystème pendant la période de l'étude était de $258 \pm 1,9$ t C ha⁻¹.

Tableau 4. Stocks et densité de carbone forestier dans les réservoirs définis par le GIEC dans 31 parcs nationaux (moyenne de 1990 à 2020). L'écart-type représente la variabilité d'une année à l'autre.

Réservoir	Stocks Mt C (\pm ET)	Densité t C ha ⁻¹ (\pm ET)
Biomasse totale	$412 \pm 17,7$	$73 \pm 3,1$
Bois mort	$194 \pm 11,8$	$34 \pm 2,1$
Litière	$300 \pm 3,9$	$53 \pm 0,7$
Sol	$546 \pm 0,6$	$97 \pm 0,1$
Total pour l'écosystème	$1452 \pm 10,6$	$258 \pm 1,9$

Le stock de carbone dans différents réservoirs et la densité totale de carbone de l'écosystème variaient d'une forêt à l'autre dans différents parcs nationaux et d'une écozone à l'autre (tableau 5). De tous les parcs, le parc national Wood Buffalo comportait le plus important stock total de carbone de l'écosystème (844 Mt C), soit 58 % du total (figure 7). Cette constatation n'est pas surprenante étant donné que le parc national Wood Buffalo est le plus grand parc au Canada, représentant 58 % de la superficie forestière totale des 31 parcs étudiés. Le parc national de la Pointe-Pelée, qui comptait la plus petite superficie forestière des 31 parcs, comptait également le plus petit stock total de carbone de l'écosystème parmi tous les parcs évalués (0,04 Mt C). Les parcs nationaux de l'écozone des plaines boréales, y compris la partie sud du parc national Wood Buffalo, représentaient 68 % de la superficie forestière totale de tous les parcs étudiés et stockaient la plus grande quantité de carbone de l'écosystème parmi toutes les écozones (tableau 5).

Parmi tous les parcs étudiés, les forêts de la RPN Pacific Rim affichaient la densité de carbone de l'écosystème la plus élevée (477 ± 4 t C ha⁻¹), tandis que celles du parc national de la Péninsule-Bruce présentaient la plus faible (150 ± 5 t C ha⁻¹) (tableau 5 et **annexe C**). Cette relation était cohérente à l'échelle de l'écozone, les forêts de l'écozone maritime du Pacifique (p. ex., RPN Pacific Rim) ayant la densité moyenne de carbone la plus élevée, et celles de l'écozone des plaines à forêts mixtes (p. ex., PN de la Péninsule-Bruce) ayant la densité de carbone la plus faible. L'absence d'exploitation forestière commerciale dans les parcs nationaux, conjuguée à la très faible fréquence des incendies causant le remplacement des peuplements dans les parcs de l'écozone maritime du Pacifique, a entraîné une forte biomasse aérienne et souterraine dans ces forêts anciennes et, par conséquent, une forte densité de carbone dans l'écosystème.

Dans une écozone donnée, les parcs ayant des forêts plus jeunes (p. ex., les forêts de la RPN des Îles-Gulf où l'âge médian est de 46 ans) présentaient des densités de carbone plus faibles que les parcs ayant des forêts plus anciennes (p. ex., les forêts de la RPN Pacific Rim où l'âge médian est de 221 ans). Le parc national des Glaciers dans l'écozone de la cordillère montagnarde, qui comportait des forêts beaucoup plus anciennes (âge médian de 164 ans) que les six autres parcs de la même écozone, présentait également une densité de carbone plus élevée que les autres parcs de la cordillère montagnarde.

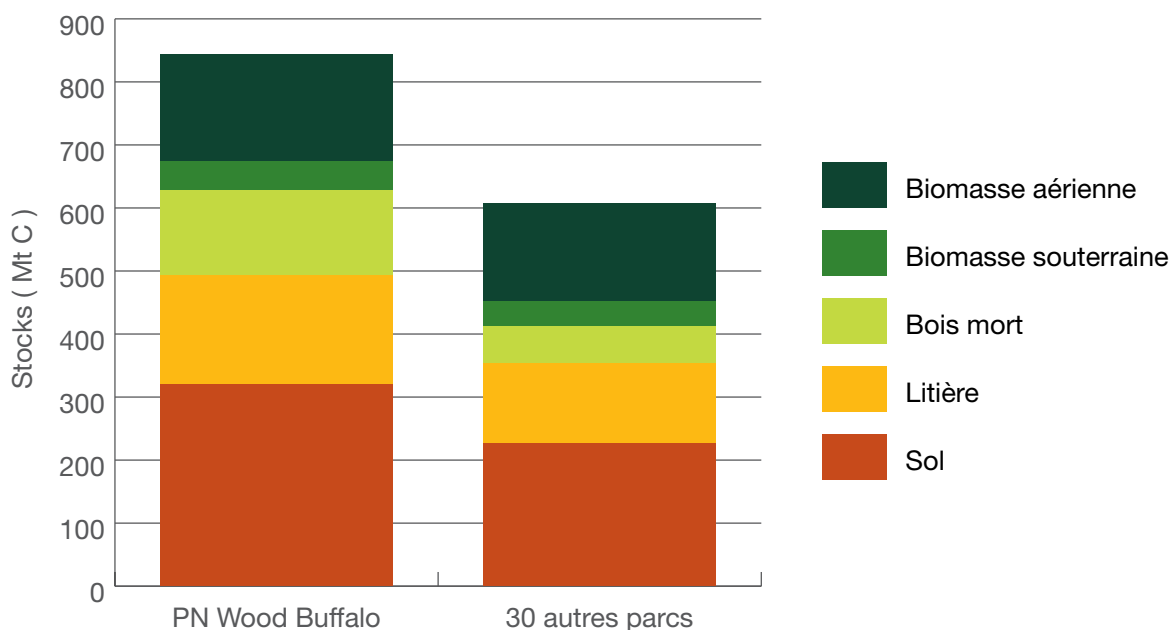


Figure 7. Stocks de carbone forestier (moyenne de 1990 à 2020) dans les réservoirs définis par le GIEC dans le parc national Wood Buffalo comparativement à tous les autres parcs combinés.

Tableau 5. Stocks de carbone forestier dans les réservoirs définis par le GIEC et densité de carbone de l'écosystème, par écozone et parc national (moyenne de 1990 à 2020).

Écozone	Stock de carbone (Mt C)										Densité de C de l'écosystème (t C ha ⁻¹) ¹
	Nom du parc	Biomasse aérienne	Biomasse souterraine	Bois mort	Litière	Sol	Total pour l'écosystème				
Maritime de l'Atlantique		6,52	1,62	2,55	5,79	12,04	28,51	192			
	PN des Hautes-Terres-du-Cap-Breton	2,66	0,64	0,91	2,43	4,85	11,48	185			
	PN Forillon	0,99	0,28	0,77	0,95	2,11	5,10	218			
	PN Fundy	0,78	0,20	0,22	0,78	1,62	3,60	185			
	PN et LHN Kejimikujik	1,57	0,37	0,47	1,16	2,40	5,96	199			
	PNBM Kejimikujik	0,03	0,01	0,01	0,03	0,07	0,15	159			
	PN Kouchibouguac	0,46	0,12	0,16	0,41	0,93	2,08	170			
	PN de l'île-du-Prince-Édouard	0,03	0,01	0,02	0,03	0,06	0,14	203			
Plaines boréales		195,90	53,14	148,91	201,99	373,08	973,02	251			
	PN de Prince Albert	15,81	4,39	8,60	13,37	27,06	69,23	200			
	PN du Mont-Riding	9,88	2,80	5,28	15,32	26,13	59,41	249			
Bouclier boréal	PN Wood Buffalo	170,21	45,95	135,03	173,30	319,88	844,38	257			
		16,17	4,12	5,93	14,80	27,15	68,16	239			
	PN des Îles-de-la-Baie-Georgienne	0,05	0,01	0,01	0,04	0,07	0,18	183			
	PN du Gros-Morne	2,58	0,59	0,88	2,55	4,36	10,96	248			
	PN de la Mauricie	3,80	0,94	1,31	2,97	5,58	14,61	309			
	RPN de l'Archipel-de-Mingan	0,22	0,06	0,08	0,17	0,35	0,88	206			
	PN Pukaskwa	8,22	2,21	3,35	8,03	14,88	36,68	218			
	PN Terra-Nova	1,29	0,31	0,29	1,05	1,91	4,85	238			

Écozone	Stock de carbone (Mt C)								Densité de C de l'écosystème (t C ha ⁻¹) ¹
	Nom du parc	Biomasse aérienne	Biomasse souterraine	Bois mort	Litière	Sol	Total pour l'écosystème		
Plaines à forêts mixtes		0,69	0,19	0,27	0,50	1,21	2,86	158	
	PN de la Péninsule-Bruce	0,46	0,13	0,20	0,35	0,85	1,98	150	
	PMN Fathom Five	0,06	0,02	0,01	0,04	0,09	0,22	161	
	PN de la Pointe-Pelée	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	185	
	PUN de la Rouge	0,10	0,02	0,03	0,06	0,14	0,36	190	
	PN des Mille-Îles	0,06	0,02	0,03	0,04	0,11	0,25	184	
Cordillère montagnarde		77,92	19,29	31,07	64,43	107,27	299,98	266	
	PN Banff	21,03	5,40	8,33	18,46	31,51	84,72	263	
	PN des Glaciers	4,73	1,05	1,43	2,63	3,37	13,21	349	
	PN Jasper	37,73	9,56	14,78	33,14	57,45	152,67	268	
	PN Kootenay	6,25	1,39	2,45	3,88	5,83	19,79	241	
	PN du Mont-Revelstoke	1,82	0,40	0,39	0,93	1,28	4,82	285	
	PN des Lacs-Waterton	2,17	0,55	0,73	1,69	3,15	8,29	243	
	PN Yoho	5,60	1,25	1,90	3,57	4,70	17,02	257	
		27,48	6,09	6,05	12,34	23,78	75,73	439	
		0,35	0,08	0,09	0,16	0,40	1,08	408	
Maritime du Pacifique	RPN des Îles-Gulf								
	RPN et site du patrimoine haida Gwaii Haanas	22,20	4,92	4,98	10,23	19,41	61,75	432	
	RPN Pacific Rim	4,92	1,09	0,97	1,95	3,96	12,90	477	
Prairies		0,74	0,19	0,37	0,75	1,42	3,47	287	
	PN Elk Island	0,74	0,19	0,37	0,75	1,42	3,47	287	
Nationale		326,8	84,9	194,1	300,5	545,9	1452,3	258	

¹ La densité de carbone de chaque réservoir est indiquée à l'annexe C.

3.1.1 Variation entre les réservoirs de carbone définis par le GIEC

Le carbone du sol représentait la plus grande réserve de carbone de l'écosystème dans les forêts pour l'ensemble des parcs (38 % des stocks de carbone totaux; figure 8). Cette proportion est passée à 72 % pour la MOM (c.-à-d. bois mort, litière, carbone du sol : figure 8). Cependant, les proportions de carbone dans différents réservoirs variaient d'une écozone à l'autre (figure 9). Par exemple, dans les parcs des plaines boréales, 74 % du stock total de carbone se trouvait dans les réservoirs de MOM et 26 % dans les réservoirs de biomasse, tandis que dans les parcs de l'écozone maritime du Pacifique, 56 % du stock total de carbone se trouvait dans les réservoirs de MOM, et 44 % du stock total de carbone se trouvait dans les réservoirs de biomasse.

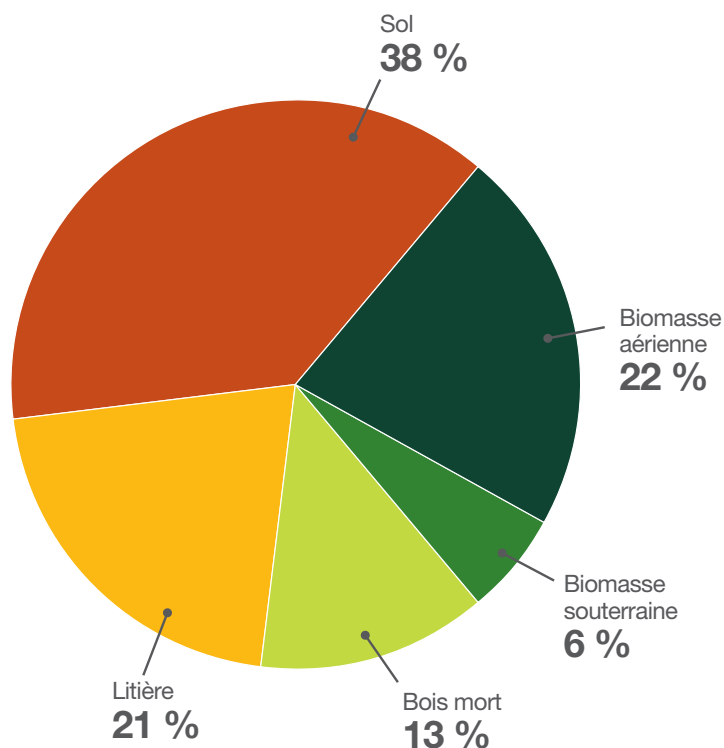


Figure 8. Proportion des stocks de carbone forestier dans les réservoirs définis par le GIEC dans 31 parcs (moyenne de 1990 à 2020).

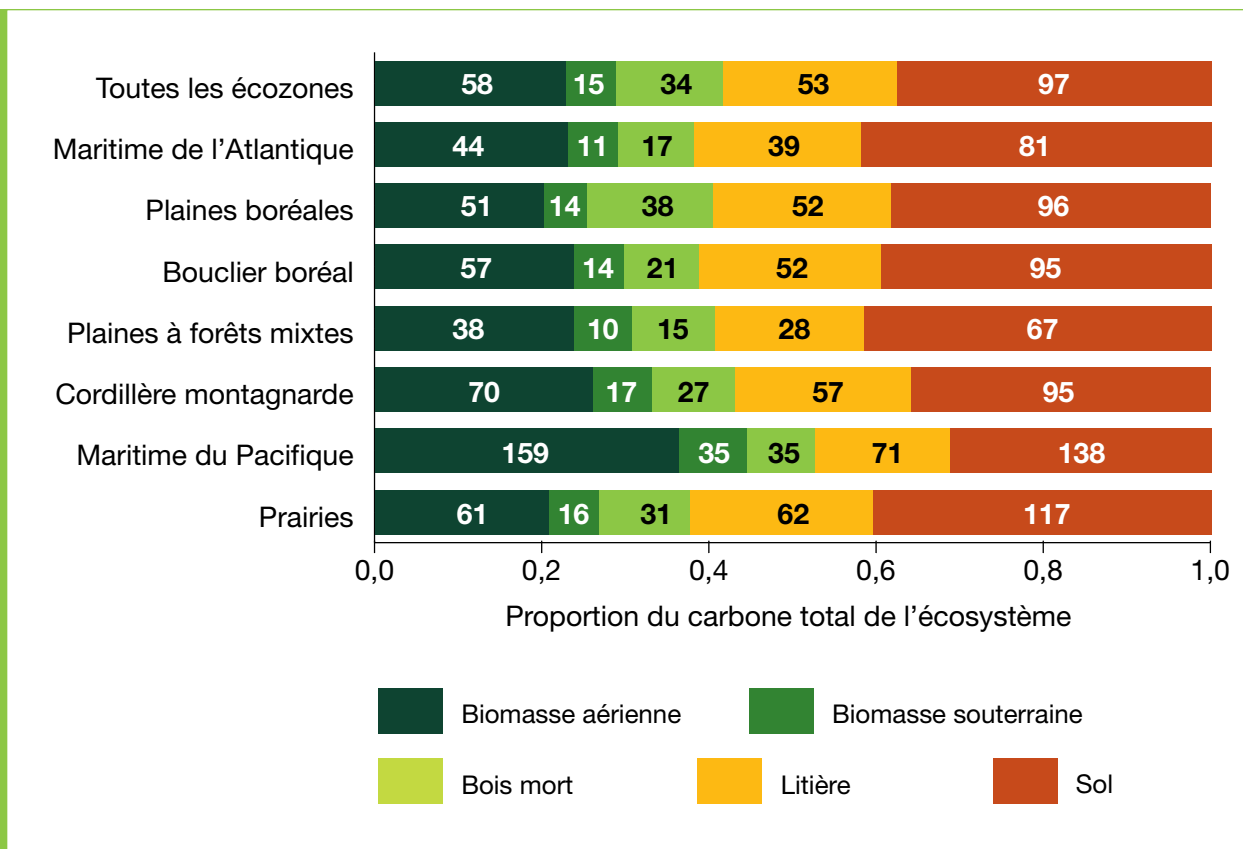


Figure 9. Proportion de la densité de carbone forestier dans les réservoirs définis par le GIEC par écozone. Les chiffres dans les barres représentent la densité moyenne de carbone dans ce réservoir de 1990 à 2020.

3.1.2 Répartition spatiale

La densité de carbone variait beaucoup à l'intérieur d'un même parc et entre les parcs. La figure 10 illustre la répartition de la densité de carbone pour 2020 dans les forêts de sept parcs nationaux, chacun étant situé dans une écozone différente. La variabilité spatiale observée peut être liée à différentes espèces d'arbres, au type de forêt et à la répartition selon l'âge (en grande partie un indicateur du régime de perturbation et de l'histoire) entre les sites, ainsi qu'aux différences de qualité des sites. Par exemple, le parc national Kootenay comptait un mélange de jeunes et de vieilles forêts (tranche d'âge : 8 à 371 ans) et, par conséquent, une mosaïque de parcelles à très forte densité de carbone où se trouvaient les vieilles forêts, et des parcelles à plus faible densité de carbone où se trouvaient les forêts plus jeunes. En revanche, le PN Terra-Nova, qui contenait des forêts plus homogènes et principalement jeunes (tranche d'âge : 20-100 ans), montrait une répartition assez uniforme de densités modérées de carbone. Malgré ces tendances de répartition contrastantes, les deux parcs affichaient presque la même densité moyenne de carbone (~240 t C ha⁻¹) en 2020. L'annexe D présente des cartes de la répartition spatiale de la densité de carbone forestier en 2020 pour tous les parcs. À l'aide du test de l'indice de Moran, nous avons déterminé des effets d'autocorrélation spatiale faibles ou non significatifs entre les parcs.

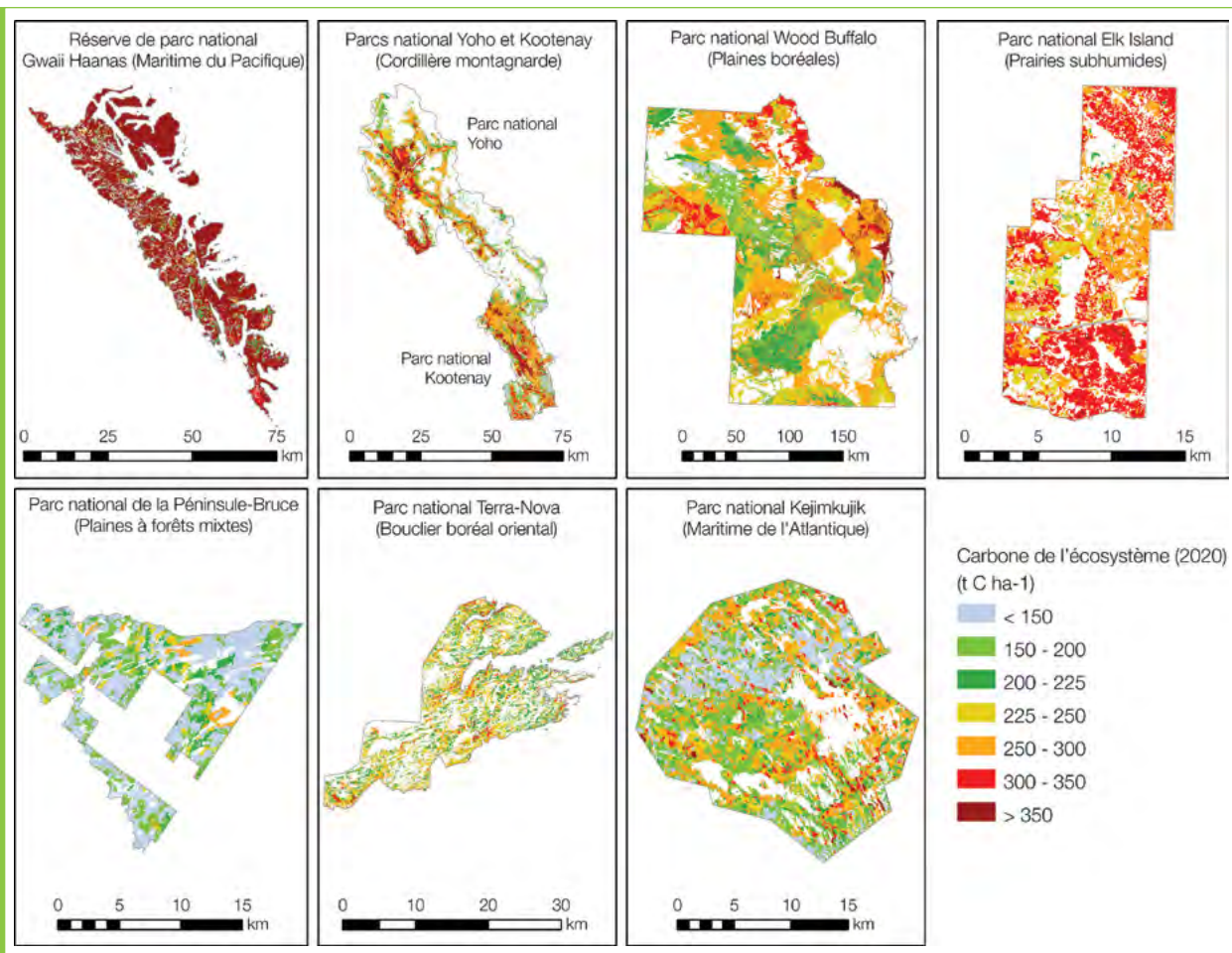


Figure 10. Répartition spatiale de la densité de carbone de l'écosystème forestier (t C ha⁻¹) dans certains parcs et écozones en 2020

3.1.3 Changements temporels dans les stocks et la densité de carbone

Les stocks moyens de carbone des 31 parcs se situaient entre 1431 et 1466 Mt C au cours de la période de l'étude (figure 11). En 1990, la première année de l'étude, les parcs contenaient collectivement 1431 Mt C dans leurs écosystèmes forestiers. En 2020, dernière année de l'étude, les parcs contenaient collectivement environ 1438 Mt C dans leurs écosystèmes forestiers, ce qui représente un gain net de 6,8 Mt C au cours de la période de 31 ans. La ventilation annuelle révèle que le carbone total de l'écosystème a augmenté au cours de la première décennie de la période de l'étude, est demeuré plus ou moins stable au cours de la deuxième décennie, et a diminué après 2011, revenant presque à la même valeur que celle enregistrée au début de la période de l'étude. Alors que la biomasse totale a diminué globalement de 5 % (21 Mt C) au cours de la période de l'étude, la matière organique morte (MOM) a augmenté globalement de 3 % (28 Mt C), et la densité globale de carbone de l'écosystème était légèrement plus élevée en 2020 qu'en 1990 (figure 11).

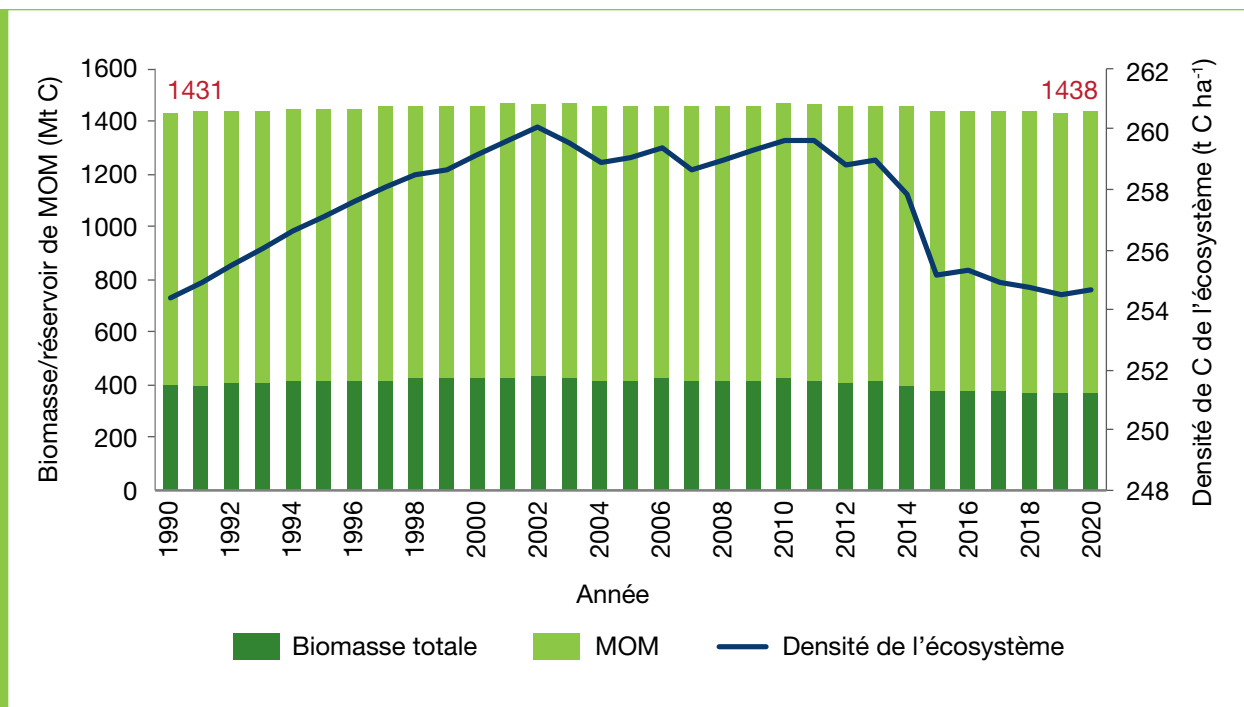


Figure 11. Biomasse forestière (aérienne + souterraine), stocks de carbone de matière organique morte (MOM) et densité totale de carbone de l'écosystème dans les 31 parcs nationaux entre 1990 et 2020. Les chiffres en rouge indiquent le carbone total de l'écosystème au début et à la fin de la période de l'étude.

Individuellement, tous les parcs affichaient des densités de carbone de l'écosystème forestier plus élevées en 2020 qu'en 1990, à l'exception du parc national des Lacs-Waterton et du parc national Wood Buffalo (figures 12a et 12b), où les feux de forêt ont entraîné des diminutions relativement importantes des densités de carbone dans les écosystèmes au cours de la dernière partie de la période de l'étude. Les parcs de l'écozone maritime du Pacifique ont non seulement affiché les densités les plus élevées tout au long de la période de l'étude, mais ils ont également montré une augmentation importante de leur densité au cours de cette même période. La RPN des Îles-Gulf a affiché la plus forte augmentation de la densité de carbone au cours de la période de l'étude. Les parcs de l'écozone des plaines à forêts mixtes présentaient une densité de carbone plus faible que la plupart des autres parcs au cours de la période de l'étude, mais ils ont néanmoins montré une augmentation importante des densités au fil du temps. Nous n'avons pas détecté d'effets significatifs d'autocorrélation temporelle dans la série chronologique à l'aide du test de Durbin-Watson. Ces résultats concordent avec ceux de Kurz et coll. (2008a).

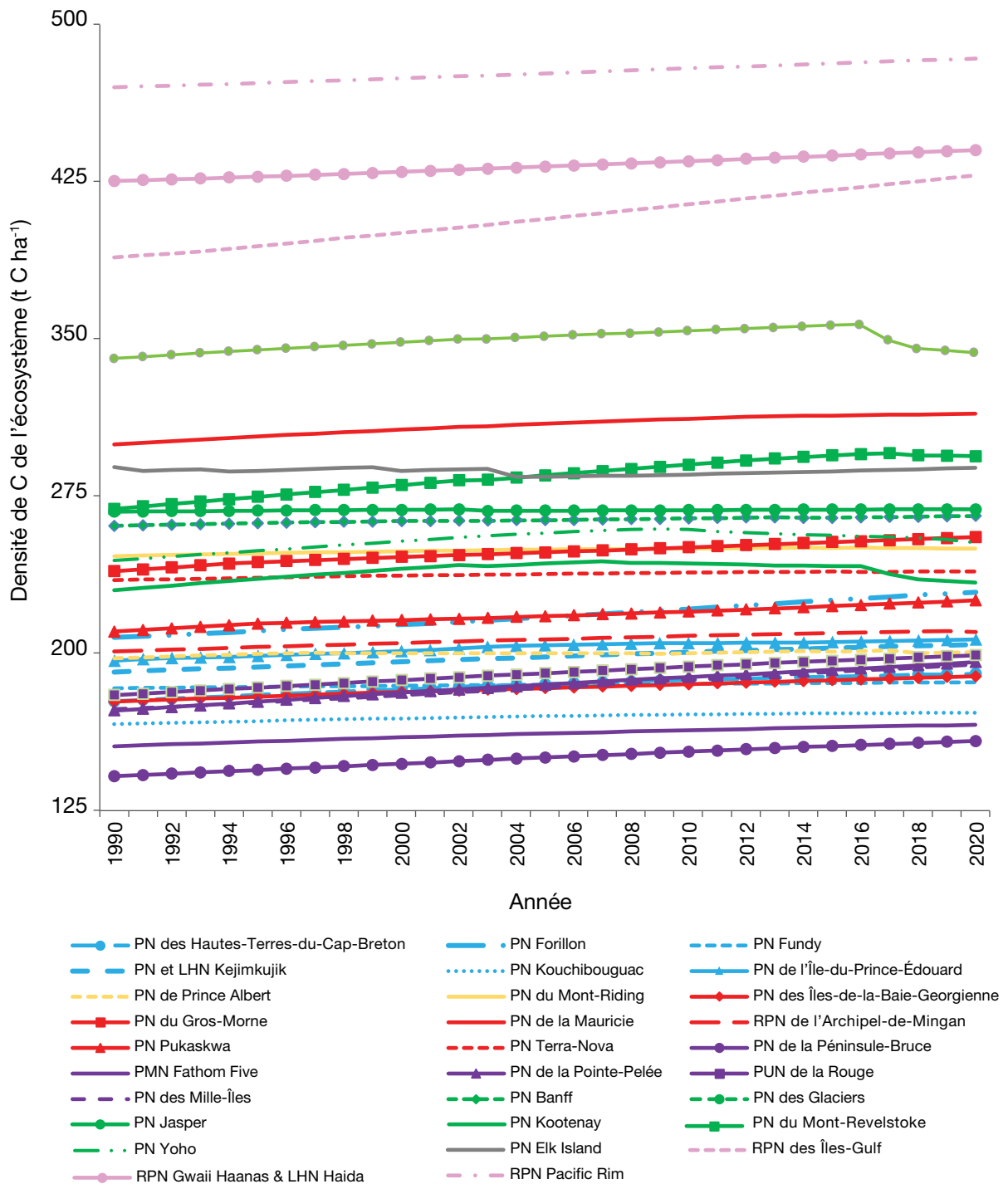


Figure 12a.

Tendance temporelle de la densité de carbone forestier dans 29 parcs nationaux qui ont montré une augmentation globale entre 1990 et 2020. Les parcs sont codés par couleur selon l'écozone. Bleu – Maritime de l'Atlantique; Jaune – Plaines boréales; Rouge – Bouclier boréal; Violet – Plaines à forêts mixtes; Vert – Cordillère montagnarde; Rose – Maritime du Pacifique; Gris – Prairies.

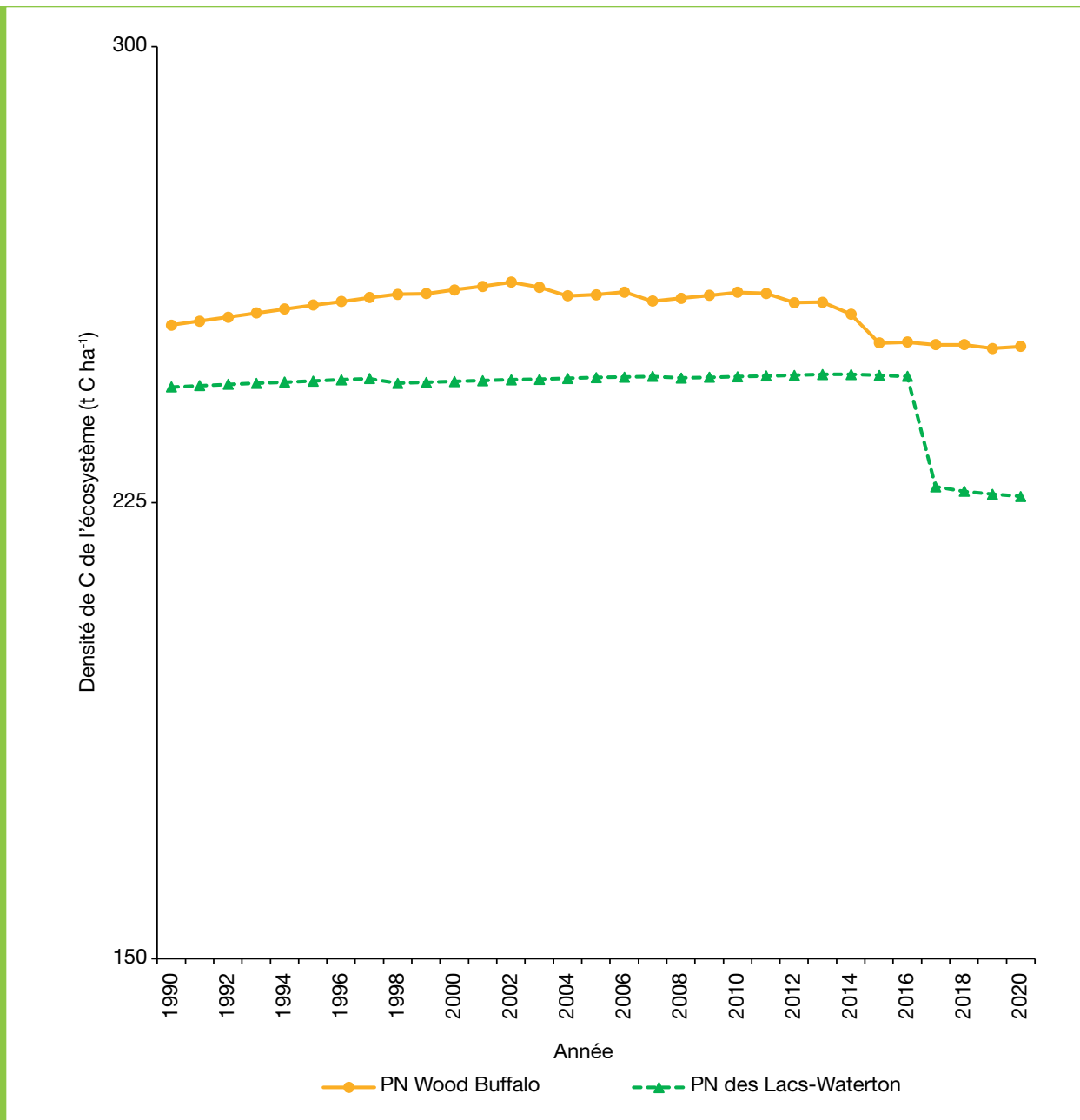


Figure 12b. Tendence temporelle de la densité de carbone forestier pour deux parcs nationaux qui ont montré une diminution de la densité entre 1990 et 2020. Les parcs sont codés par couleur selon l'écozone. Jaune – Plaines boréales; Vert – Cordillère montagnarde.

Les figures 13a à d montrent la répartition spatiale de la biomasse, de la MOM et de l'ensemble des réservoirs de carbone de l'écosystème pour trois ans (1990, 2010, 2020) pour quatre parcs ayant des régimes de perturbation différents : le parc national Kouchibouguac, qui n'a pas été touché par des perturbations mesurables au cours de cette période (figure 13a); le parc national des Lacs-Waterton, qui a été touché par un important feu de forêt en 2017 (figure 13b); le parc national Pukaskwa, qui a été touché principalement par des perturbations causées

par des insectes, certains brûlages dirigés et très peu de petits feux de forêt au cours de la période (figure 13c); et le parc national de Prince Albert, qui a été touché par les trois types de perturbations – feux de forêt, brûlages dirigés et insectes (figure 13d).

Dans le parc national Kouchibouguac, en raison de l'absence de feux de forêt importants et d'épidémies d'insectes pendant la période d'étude de 1990 à 2020, la densité de la biomasse et du carbone de l'écosystème a légèrement augmenté dans le parc. La variation de la densité des différents réservoirs a été graduelle, sans transfert important entre les réservoirs de carbone, lesquels sont habituellement associés à des perturbations majeures (figure 13a).

Dans le parc national des Lacs-Waterton, entre 1990 et 2010, une partie du carbone contenu dans le réservoir de biomasse a été transférée dans les réservoirs de MOM à la suite de perturbations causées par les insectes, sans changement important du carbone total de l'écosystème (figure 13b). En 2017, cependant, il y a eu un important feu de forêt dans le parc (15 752 ha touchés, soit 45 % de la superficie forestière du parc), ce qui a entraîné des pertes de biomasse vivante, mais des gains de MOM dans les zones touchées. Ces changements sont évidents à la figure 13b, panneau de 2020, les zones de perte de carbone de la biomasse étant indiquées en bleu, et les zones de gain de carbone de la MOM, en rouge. Une quantité importante de biomasse et de carbone de la MOM a également été perdue en raison des émissions directes de GES associées aux incendies, ce qui a entraîné une diminution des stocks de carbone de l'écosystème de ces régions en 2020.

Bien que les forêts du parc national Pukaskwa n'aient pas été touchées de façon importante par les feux de forêt, elles ont été gravement touchées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette à la fin des années 1990. De petits transferts de carbone de la biomasse à la MOM ont eu lieu dans la partie sud du parc, qui a été la plus touchée par cet insecte (figure 13c). Le carbone de la biomasse a augmenté dans d'autres parties du parc qui ont été moins touchées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette entre 1990 et 2020. Les stocks de carbone de l'écosystème ont augmenté dans l'ensemble du parc entre 1990 et 2020 (figure 12a).

Le parc national de Prince Albert a été touché par des feux de forêt et des éclosions de tordeuse des bourgeons de l'épinette pendant la période de l'étude, et il y a également eu des brûlages dirigés dans le parc. Des pertes de carbone de la biomasse dans les forêts ont été observées au fil du temps du côté nord du parc, qui a été touché par les incendies, avec de petites augmentations de MOM dans ces régions et dans les régions touchées par les insectes (figure 13d). Par conséquent, les stocks de carbone de l'écosystème ont diminué du côté nord du parc, tandis que des gains de carbone de l'écosystème ont été observés du côté sud.

Parc national Kouchibouguac (Nouveau-Brunswick)

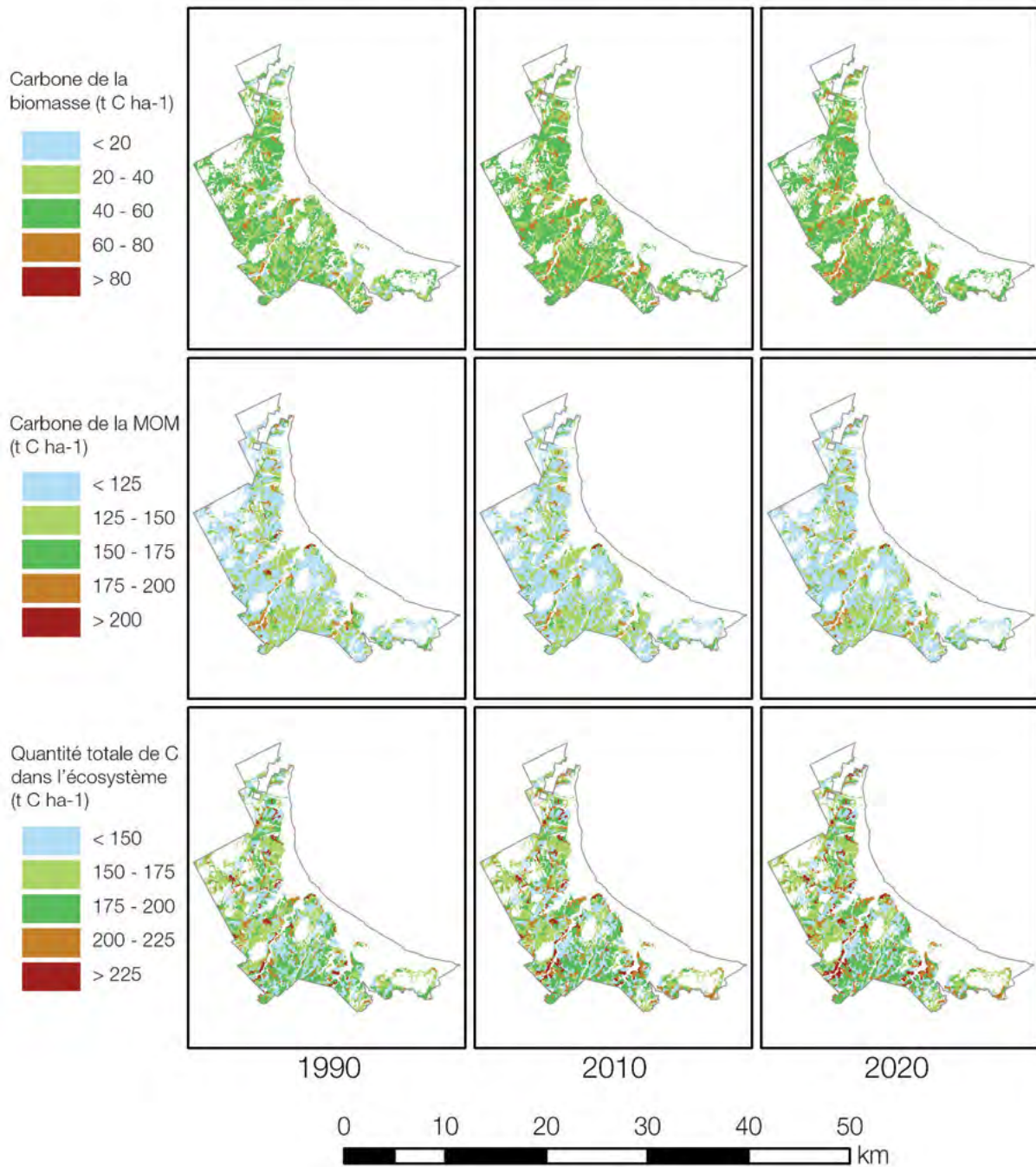


Figure 13a. Changements temporels de la biomasse, de la MOM et de la densité totale du carbone de l'écosystème (t C ha⁻¹) dans les écosystèmes forestiers du PN Kouchibouguac (1990, 2010 et 2020).

Parc national des Lacs-Waterton (Alberta)

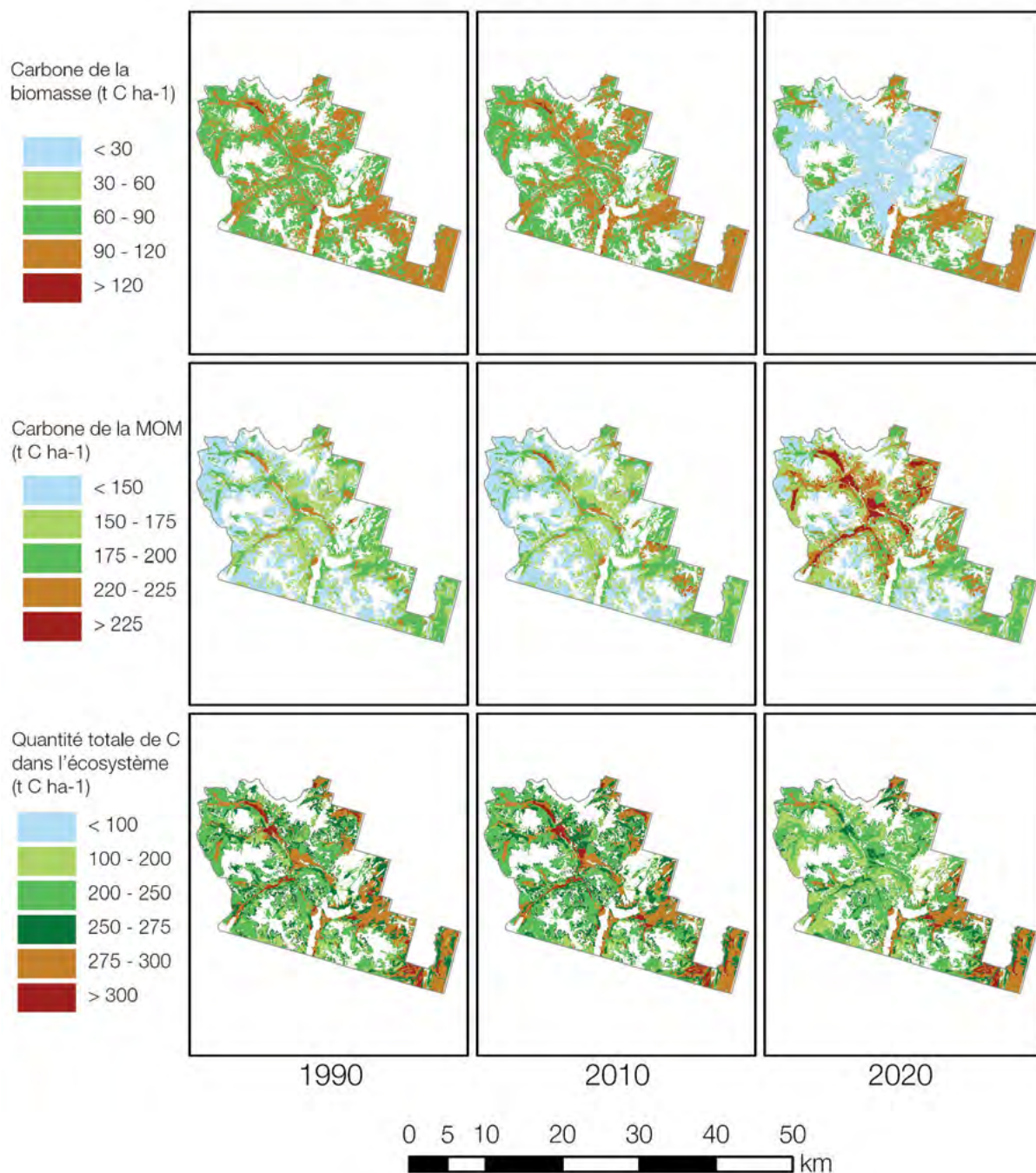


Figure 13b. Changements temporels de la biomasse, de la MOM et de la densité totale du carbone de l'écosystème (t C ha⁻¹) dans les écosystèmes forestiers du PN des Lacs-Waterton (1990, 2010 et 2020).

Parc national Pukaskwa (Ontario)

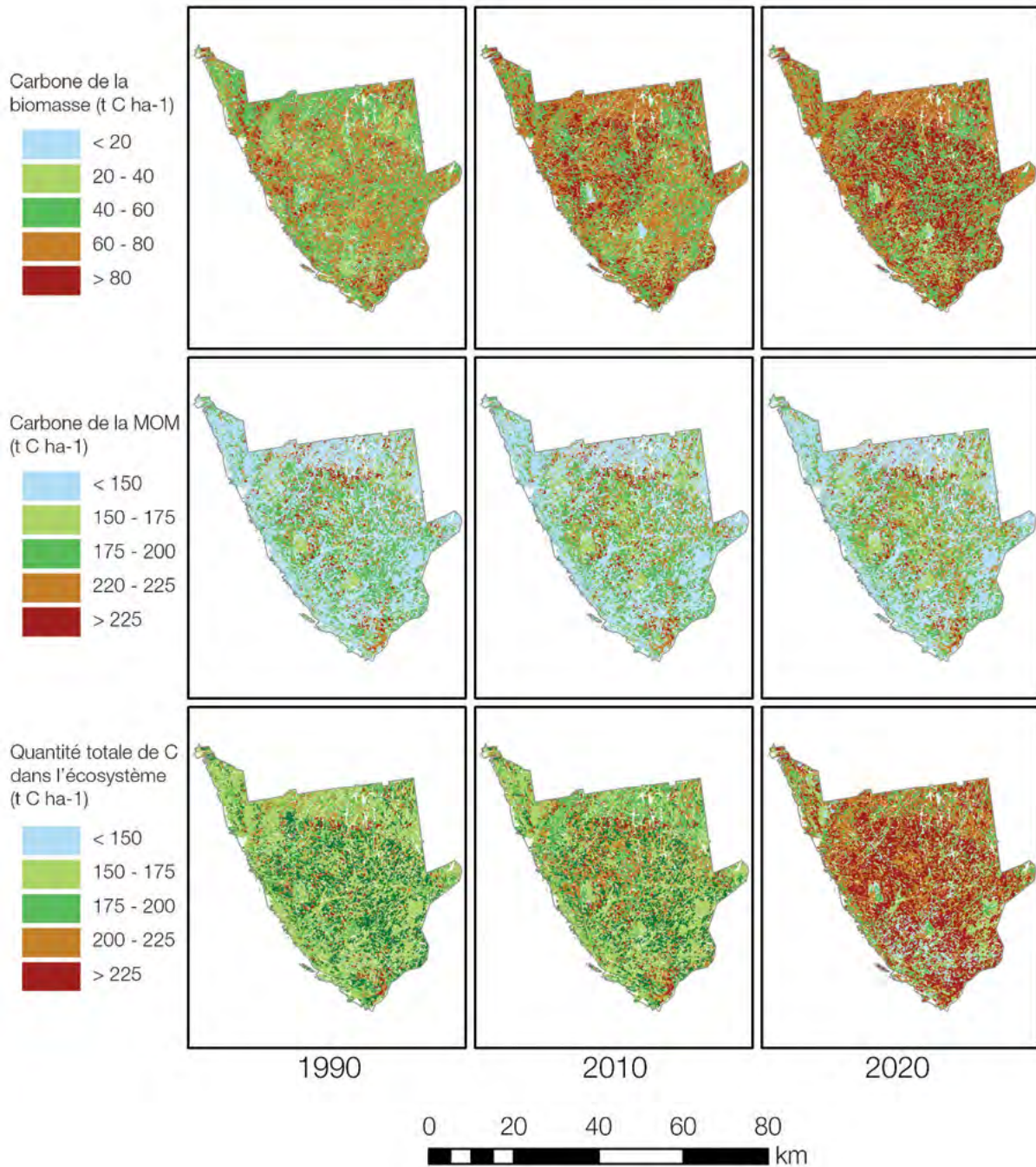


Figure 13c. Changements temporels de la biomasse, de la MOM et de la densité totale du carbone de l'écosystème (t C ha⁻¹) dans les écosystèmes forestiers du PN Pukaskwa (1990, 2010 et 2020).

Parc national de Prince Albert (Saskatchewan)

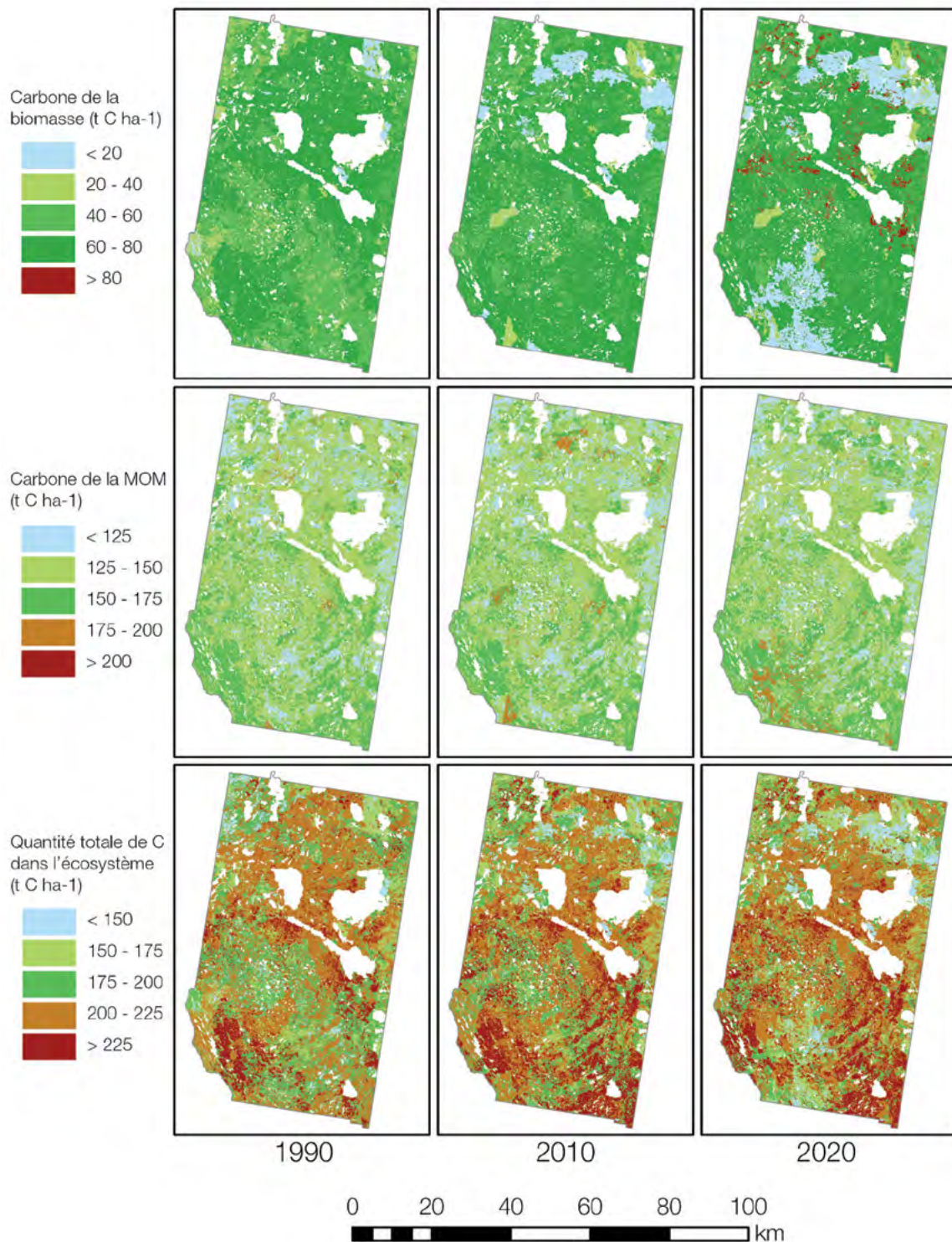


Figure 13d. Changements temporels de la biomasse, de la MOM et de la densité totale du carbone de l'écosystème (t C ha⁻¹) dans les écosystèmes forestiers du PN de Prince Albert (1990, 2010 et 2020).

3.2 Flux de carbone

3.2.1 Production primaire nette, respiration hétérotrophe et productivité nette de l'écosystème

Les résultats agrégés pour les écosystèmes forestiers de 31 parcs nationaux sont résumés pour les trois principaux flux de carbone – productivité primaire nette (PPN), respiration hétérotrophe (R_h) et productivité nette de l'écosystème (PNE) – au tableau 6, et présentés à la figure 15. La quantité moyenne de carbone séquestré annuellement à partir de l'atmosphère par la production primaire nette (PPN) dans tous les parcs nationaux était de 21,7 Mt C par année pendant la période de l'étude. De ce nombre, une moyenne de 19,3 Mt C par année a été perdue dans l'atmosphère par la respiration hétérotrophe (R_h). Par conséquent, en moyenne, environ 2,4 Mt C par année (11 %) de PPN se sont accumulées dans l'écosystème sous forme de productivité nette de l'écosystème (PNE). La plus grande partie de cette PNE a été perdue par la suite en raison de perturbations, ce qui a laissé une moyenne d'environ 1 % de la PPN comme quatrième flux de carbone, la productivité nette du biome (PNB; tableau 6), dans les écosystèmes forestiers des 31 parcs étudiés.

Tableau 6. Flux de carbone forestier et bilan net des GES dans 31 parcs nationaux (de 1990 à 2020). Les écarts-types représentent la variabilité temporelle et non l'incertitude statistique.

	Indicateur	Flux total (Mt C an ⁻¹)	Flux par unité de surface (t C ha ⁻¹ an ⁻¹)
Flux	PPN	21,7 ± 0,02	3,86 ± 0,01
	R_h	19,3 ± 0,01	3,43 ± 0,01
	PNE	2,40 ± 0,02	0,42 ± 0,01
	PNB	0,22 ± 0,13	0,04 ± 0,02
	Indicateur	Mt éq. CO ₂ an ⁻¹	t éq. CO ₂ ha ⁻¹ an ⁻¹
GES	GES ¹⁹	0,20 ± 0,52	0,04 ± 0,09

Il y a eu peu de variation temporelle dans l'ensemble de la PPN pour les écosystèmes forestiers dans tous les parcs au cours de la période de l'étude, bien qu'elle ait légèrement diminué (de 1 Mt C) entre 1990 et 2020, tandis que la R_h a légèrement augmenté au cours de la même période (figure 15). Dans notre modèle, les variables climatiques ont été maintenues constantes (voir les méthodes). Étant donné que la température et le bilan hydrique peuvent avoir une incidence à la fois sur la PPN et la R_h , la variabilité temporelle réelle de ces indicateurs peut donc être plus élevée que ce qui est indiqué dans ces estimations.

19 Les GES sont mesurés en éq. CO₂ selon le PRP du Quatrième rapport d'évaluation du GIEC pour le CH₄ et le N₂O.

Les parcs de l'écozone des plaines à forêts mixtes affichaient la PNE globale la plus élevée par unité de surface pendant la période de l'étude, suivis des parcs de l'écozone du bouclier boréal est, tandis que les parcs de l'écozone de la cordillère montagnarde affichaient la PNE la plus basse par unité de surface (figure 16). Les forêts anciennes des parcs de l'écozone maritime du Pacifique ont contribué à des rejets annuels de carbone très élevés par décomposition (R_h) parce que leurs réservoirs de MOM étaient très grands. Par conséquent, même s'ils comptaient la PPN la plus élevée, les parcs de cette écozone affichaient une faible accumulation annuelle nette globale de carbone. Les forêts des parcs de l'écozone de la cordillère montagnarde ont connu des perturbations plus fréquentes et des taux de décomposition élevés (R_h) au cours de la période de l'étude, non seulement au cours de l'année réelle d'une perturbation, mais aussi au cours des années subséquentes. Par conséquent, ces parcs affichaient la PNE par unité de surface la plus basse. Les forêts situées dans les parcs de l'écozone des plaines à forêts mixtes affichaient la PPN la plus faible, mais aussi la R_h la plus faible de toutes les écozones, ce qui a fait que ces forêts comptaient la PNE la plus élevée par unité de surface. Les valeurs moyennes de la PPN, de la R_h et de la PNE pour chaque parc au cours de la période à l'étude sont présentées à l'**annexe E**.

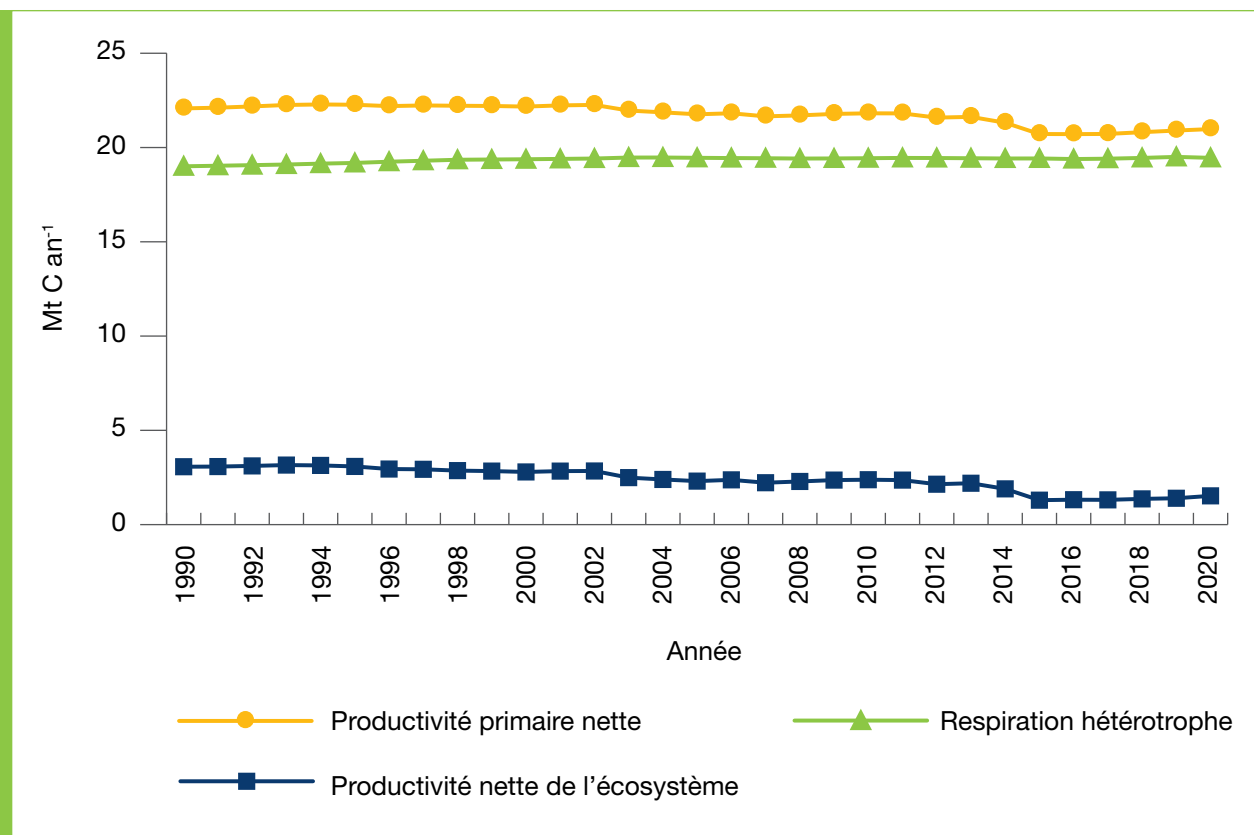


Figure 14. Tendence temporelle des flux de carbone (mesurés en tant que PPN, R_h , PNE) pour les écosystèmes forestiers dans les 31 parcs nationaux de 1990 à 2020.

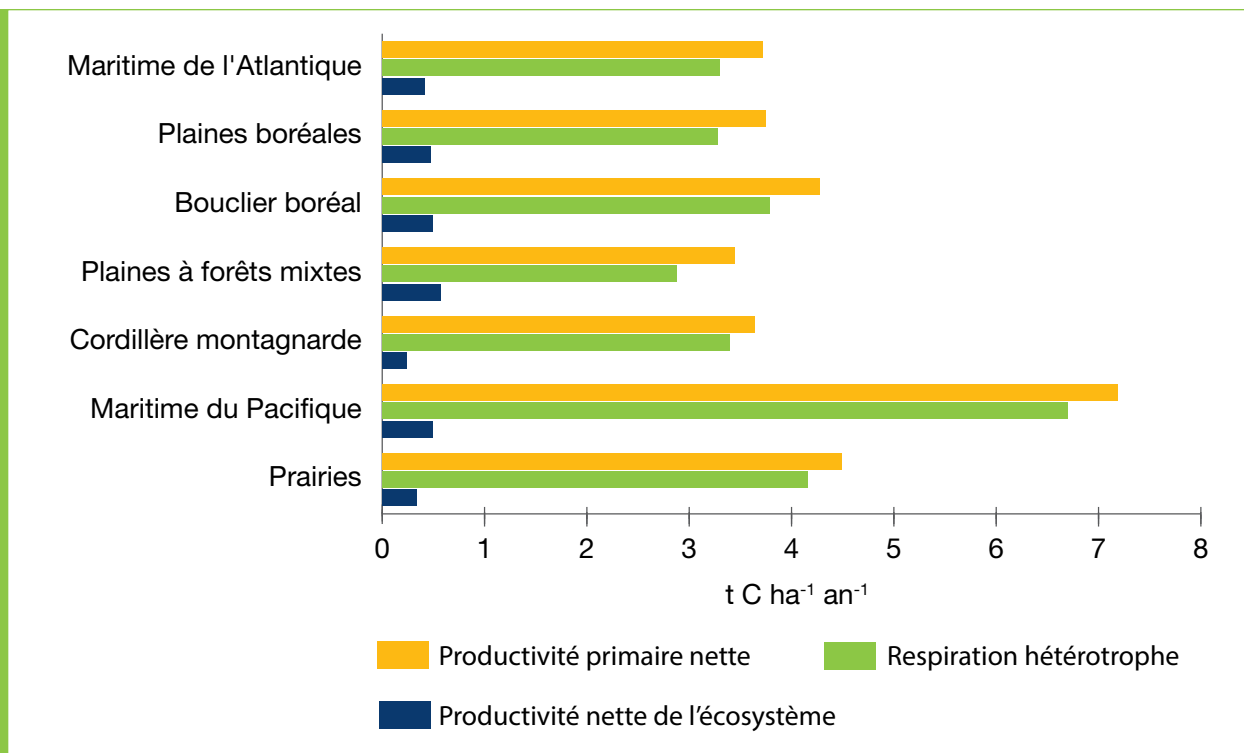


Figure 15. Flux de carbone par unité de surface (moyenne de 1990 à 2020) par écozone.

La productivité nette de l'écosystème est influencée par l'âge des forêts et les perturbations qui touchent la structure des classes d'âge des forêts. La PNE a augmenté pour cinq parcs au cours de la période de l'étude (figure 16a), dont trois se trouvent dans l'écozone maritime du Pacifique relativement non perturbée. La PNE a également augmenté de façon constante dans la RPN des Îles-Gulf (figure 16a), où les jeunes forêts (âge médian de 46 ans en 1990) ne présentaient aucune perturbation mesurable. D'autres parcs situés dans la même écozone (maritime du Pacifique) ayant des forêts plus anciennes, mais sans aucune perturbation mesurable (c.-à-d. la RPN Pacific Rim et la RPN Gwaii Haanas, les deux ayant des âges de peuplement moyens supérieurs à 180 ans en 1990), ont également affiché une augmentation de la PNE, bien qu'à un taux beaucoup plus faible que celui de la RPN des Îles-Gulf. Pour ces parcs, le taux de décomposition des processus naturels (R_h) s'approchait de celui de la production de la biomasse, ce qui a entraîné un taux d'augmentation plus faible de la PNE.

La productivité nette de l'écosystème a diminué entre 1990 et 2020 pour les parcs qui ont été plus fréquemment touchés par les perturbations (figure 16b). Comme prévu, la PNE a diminué lors de l'année au cours de laquelle une perturbation s'est produite, et l'ampleur de la diminution dépendait de la superficie totale touchée par la perturbation. La PNE a ensuite augmenté après quelques années au point où la production de la biomasse (PPN) était supérieure aux pertes dues à la décomposition (R_h ; voir l'exemple du PN Wood Buffalo à la figure 17). Les perturbations survenues au cours d'une année donnée (comme les feux de forêt qui ont entraîné la mortalité des arbres) ont entraîné une diminution de la PPN cette année-là et une augmentation de la R_h , ce qui a donné lieu à de faibles valeurs de PNE la même année.

Les parcs de l'écozone de la cordillère montagnarde ont été plus fréquemment touchés par des incendies après 2000 (p. ex., le PN Kootenay, le PN des Glaciers, le PN Yoho, le PN des Lacs-Waterton) et, par conséquent, ont montré non seulement un déclin continu des valeurs de la PNE, mais aussi des valeurs négatives de la PNE pendant la période de l'étude. Les taux de décomposition dans les forêts de ces parcs étaient beaucoup plus élevés que leur production de la biomasse, ce qui a entraîné des valeurs négatives de la PNE (p. ex., le PN des Glaciers, le PN des Lacs-Waterton et la RPN de l'Archipel-de-Mingan).

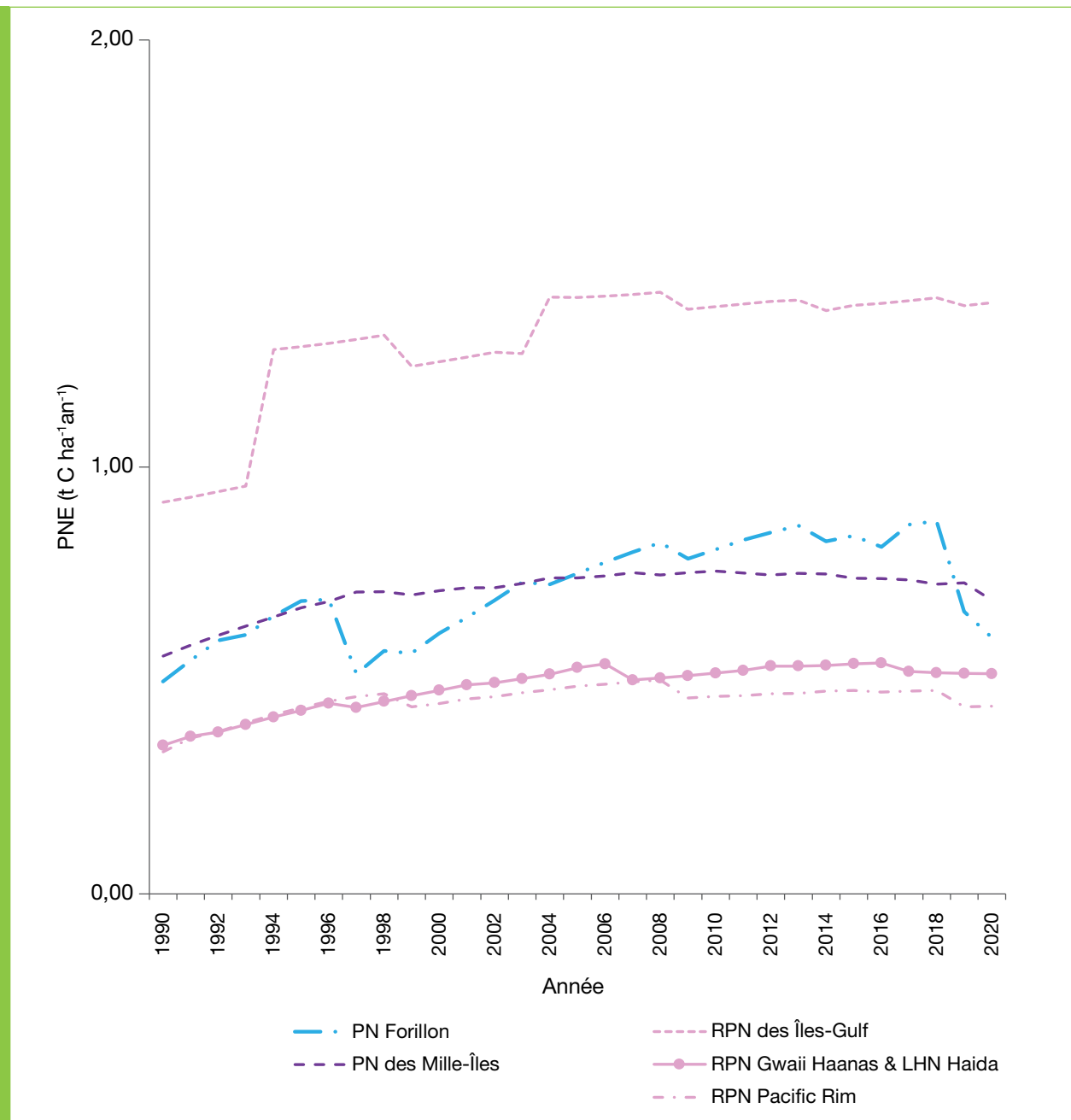


Figure 16a. Productivité nette de l'écosystème de cinq parcs nationaux qui ont affiché une augmentation entre 1990 et 2020. Les parcs sont codés par couleur selon l'écozone. Bleu – Maritime de l'Atlantique; Violet – Plaines à forêts mixtes; Rose – Maritime du Pacifique.

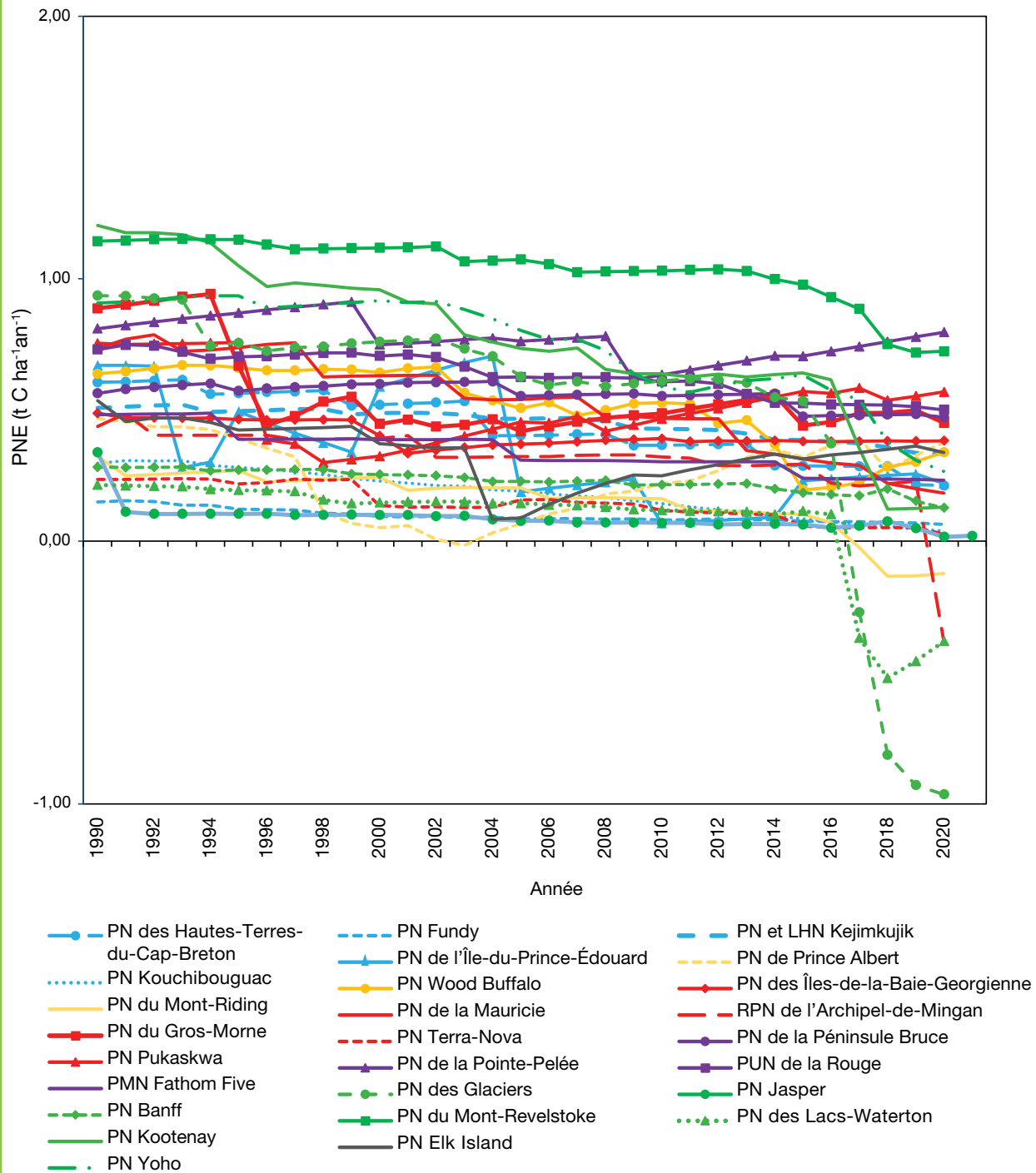


Figure 16b. Productivité nette de l'écosystème de 26 parcs nationaux qui ont affiché une diminution entre 1990 et 2020. Les parcs sont codés par couleur selon l'écozone. Bleu – Maritime de l'Atlantique; Jaune – Plaines boréales; Rouge – Bouclier boréal; Violet – Plaines à forêts mixtes; Vert – Cordillère montagnarde; Gris – Prairies. Les valeurs moyennes de la PNE par parc sont présentées à l'annexe E.

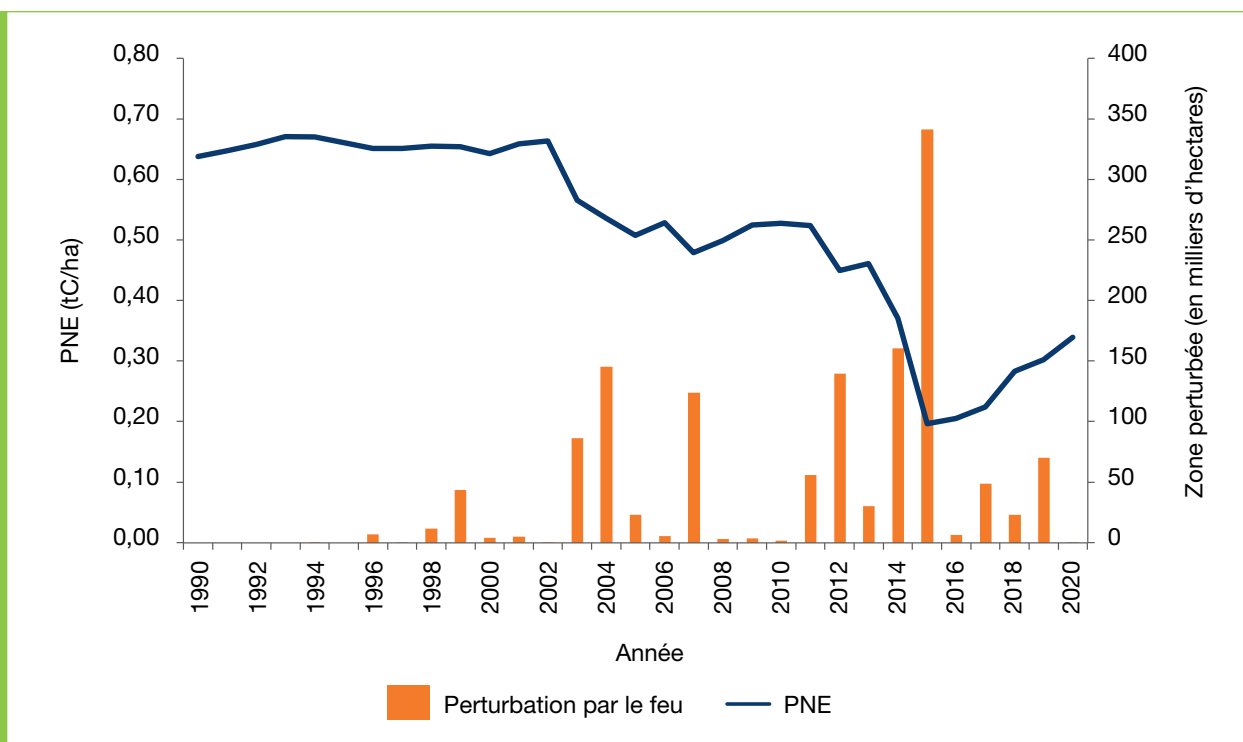


Figure 17. Répercussions des changements de la superficie perturbée par les feux de forêt sur la productivité nette de l'écosystème (PNE) pour les écosystèmes forestiers du parc national Wood Buffalo (de 1990 à 2020).

3.2.2 Effets des perturbations sur les flux de carbone

Les feux de forêt sont la source des plus importants rejets directs de carbone dans l'atmosphère en raison de perturbations (tableau 7). La plupart de ces émissions de carbone provenaient de la combustion de matière organique morte pendant les feux de forêt. Les brûlages dirigés dans les parcs ont également entraîné des rejets, mais ceux-ci étaient faibles comparativement à ceux causés par les feux de forêt. Les émissions attribuables aux épidémies d'insectes étaient négligeables comparativement à celles provenant des feux de forêt.

Tableau 7. Flux et transferts de carbone forestier (kt C) résultant des perturbations dans 31 parcs nationaux (total pour la période de 1990 à 2020).

Type de perturbation	Rejets directs de carbone	Rejets de carbone de la biomasse	Rejets de carbone de la MOM	Transferts de biomasse vers la MOM
Feux de forêt	65 996	12 832	53 164	95 280
Insectes	14	14	0	17 282
Brûlages dirigés	1 495	287	1 208	1 180
Récolte	0	0	0	1
Total	67 505	13 132	54 372	113 742

Remarque : 1 kt = 1 000 tonnes

Les transferts de carbone de la biomasse vers les réservoirs de MOM ont été les plus importants flux de carbone provenant de perturbations, les feux de forêt ayant entraîné les plus importants transferts de carbone vers la MOM (tableau 7). Les épidémies d'insectes ont entraîné des transferts globaux importants, mais moindres, de carbone de la biomasse vers la MOM. Ces transferts vers la MOM contribueront aux futurs rejets de carbone provenant de la décomposition ou de la combustion de matière organique morte. Parmi les insectes, le dendroctone du pin ponderosa et la livrée des forêts dans l'Ouest ainsi que la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans l'Est ont le plus contribué aux transferts de biomasse vers la MOM (9 Mt C, 2,2 Mt C et 3,5 Mt C, respectivement, sur une période de 31 ans).

Les transferts de biomasse vers les réservoirs de MOM variaient chaque année (figure 18) selon la zone touchée par les perturbations, et étaient plus élevés pendant les années de grands feux de forêt. (L'annexe F présente la zone touchée par les perturbations pour les 31 parcs). La superficie totale touchée par les feux de forêt chaque année au cours de la période de l'étude a augmenté considérablement après 2002, ce qui a entraîné une augmentation des transferts de carbone de la biomasse vers la MOM. Les épidémies d'insectes qui ont touché les forêts des parcs ont augmenté considérablement après 2003, ce qui a encore une fois entraîné une augmentation des transferts de biomasse vers la MOM.

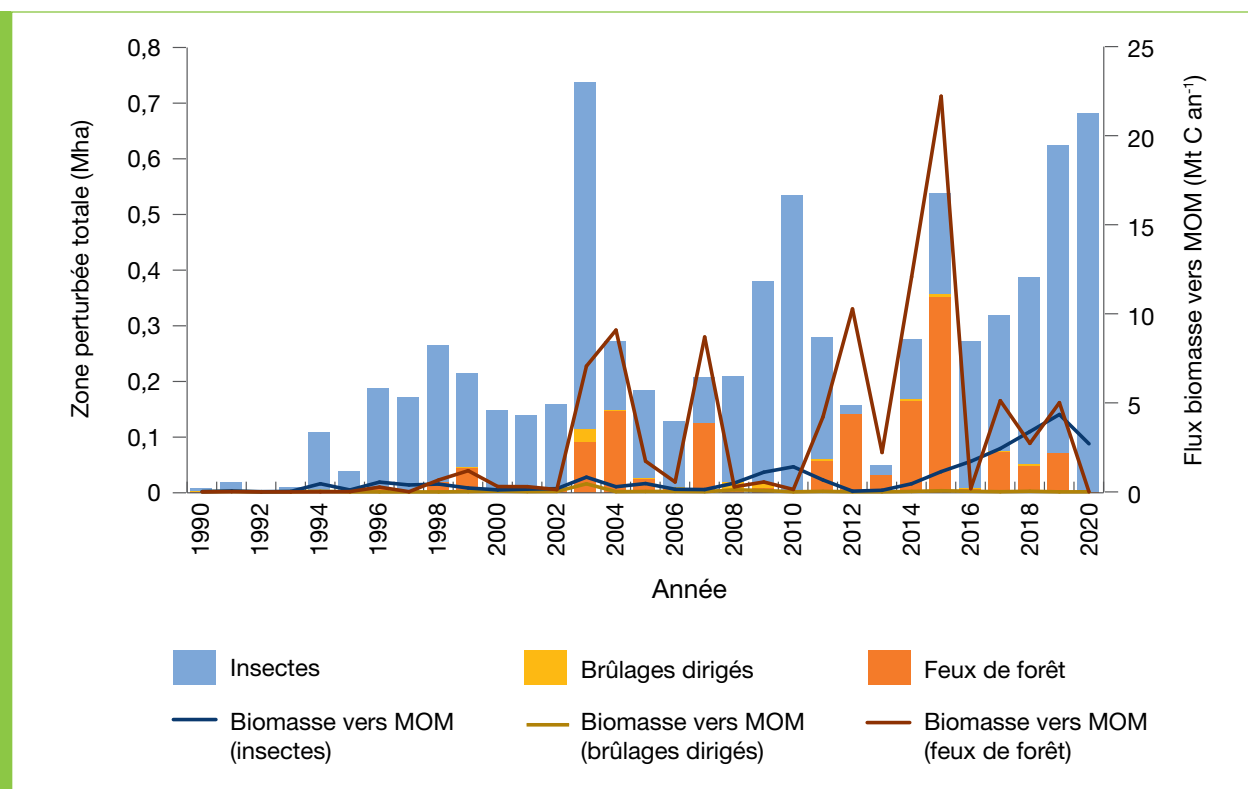


Figure 18. Transferts de la biomasse vers la MOM (axe vertical droit) dus à la zone touchée par les feux de forêt et d'autres perturbations dans 31 parcs (de 1990 à 2020).

La zone perturbée par les insectes correspond à la quantité totale de nouvelles zones touchées au cours d'une année donnée. Les barres représentent la zone (Mha) touchée par différents types de perturbations forestières (axe vertical gauche). Les lignes représentent le transfert de la biomasse vers la MOM (Mt C an⁻¹) pour chaque perturbation. BD = brûlages dirigés.

3.2.3 Productivité nette du biome

À l'échelle de chaque parc, la PNB totale pendant la période de l'étude était positive pour les forêts de 29 parcs, indiquant qu'ils constituaient des puits de carbone. Seulement deux parcs, le parc national Wood Buffalo et le parc national des Lacs-Waterton, ont affiché une PNB totale négative pendant la période de l'étude, ce qui indique que ces aires protégées étaient des sources nettes de carbone (figure 19). À l'échelle de l'écozone, l'écozone des plaines boréales, qui comprenait la plus grande superficie de parc touchée par des perturbations fréquentes et importantes au cours de l'étude, était la seule écozone qui affichait une valeur globale négative de la PNB, en raison de la tendance observée au parc national Wood Buffalo.

La PNB annuelle a été principalement positive pour tous les parcs qui ont été touchés par des perturbations peu fréquentes ou légères au cours de la période de 1990 à 2020 (figure 20a). En revanche, la PNB annuelle a été négative pendant plusieurs années pour les parcs qui ont été touchés par des perturbations fréquentes ou importantes, en particulier ceux des écozones de la cordillère montagnarde et des plaines boréales (figure 20b) qui ont été touchés par des feux de forêt. L'**annexe G** présente les valeurs annuelles de la PNB annuelle pour chaque parc évalué au cours de la période de l'étude.

Dans l'ensemble, les écosystèmes forestiers des 31 parcs nationaux ont constitué un petit puits de carbone, avec une productivité cumulative nette du biome (PNB) de 6,8 Mt C et une absorption nette moyenne de carbone de 0,22 Mt C par année au cours de la période d'étude de 31 ans (tableau 6; figure 21). Cependant, sur une échelle annuelle, les 31 parcs ont constitué une source nette de carbone au cours de neuf années différentes (c.-à-d. 2003, 2004, 2007, 2012, 2014, 2015, 2017, 2018 et 2019), et ont rejeté en moyenne 4,1 Mt C par année pendant ces années (figure 21). La PNB cumulative a montré une tendance assez régulière de montée-plateau-chute correspondant à trois périodes distinctes dans la série chronologique. De 1990 à 2002, la PNB annuelle a été positive et la PNB cumulative a augmenté en moyenne de 2,7 Mt C par année dans l'ensemble des 31 parcs. Pendant cette période, il y a eu relativement peu de perturbations dans les parcs et il y a eu un gain net de carbone. De 2003 à 2011, la PNB annuelle a été positive certaines années et négative d'autres années, la PNB cumulative demeurant plus ou moins constante, avec un changement global minimal (0,1 Mt C an⁻¹). À partir de 2012, il y a eu d'importantes fluctuations dans la PNB annuelle en raison de perturbations fréquentes, y compris d'importants feux de forêt dans deux parcs nationaux de l'Alberta. Par conséquent, la PNB cumulative a diminué de façon constante jusqu'en 2020 (-2,4 Mt C an⁻¹). La plus grande partie du carbone gagné au cours de la période initiale (de 1990 à 2002) a par la suite été perdue en 2020 en raison de l'augmentation des incendies et des perturbations causées par les insectes.

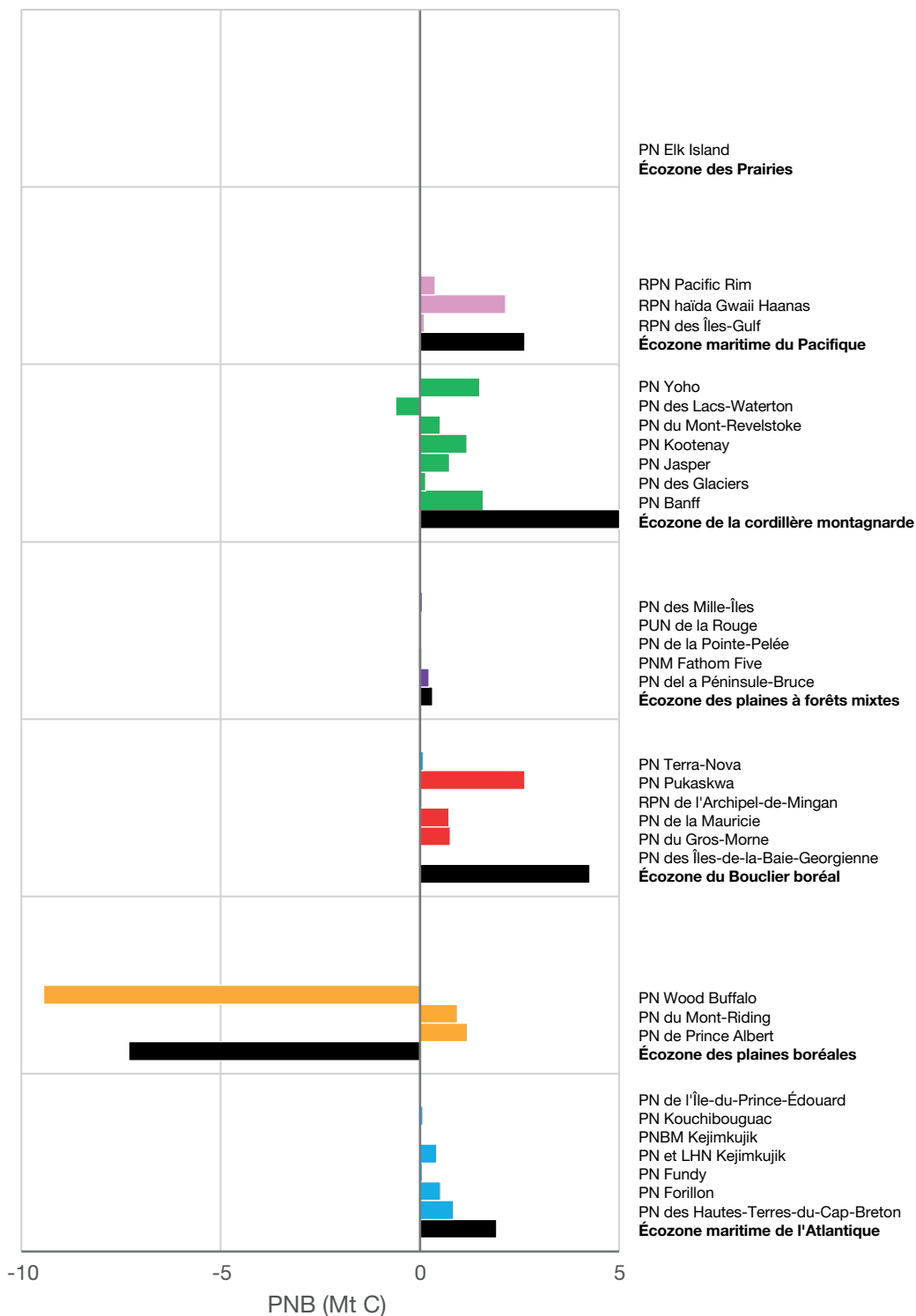


Figure 19. Total de la PNB pour les écosystèmes forestiers, par parc et écozone entre 1990 et 2020. Les parcs sont regroupés par écozone, et les noms des écozones sont en caractères gras. Les barres noires représentent la PNB totale pour l'écozone pour chaque groupe. Les valeurs positives de la PNB indiquent une augmentation des stocks de carbone de l'écosystème (puits nets) et les valeurs négatives indiquent des pertes de carbone de l'écosystème (sources nettes).

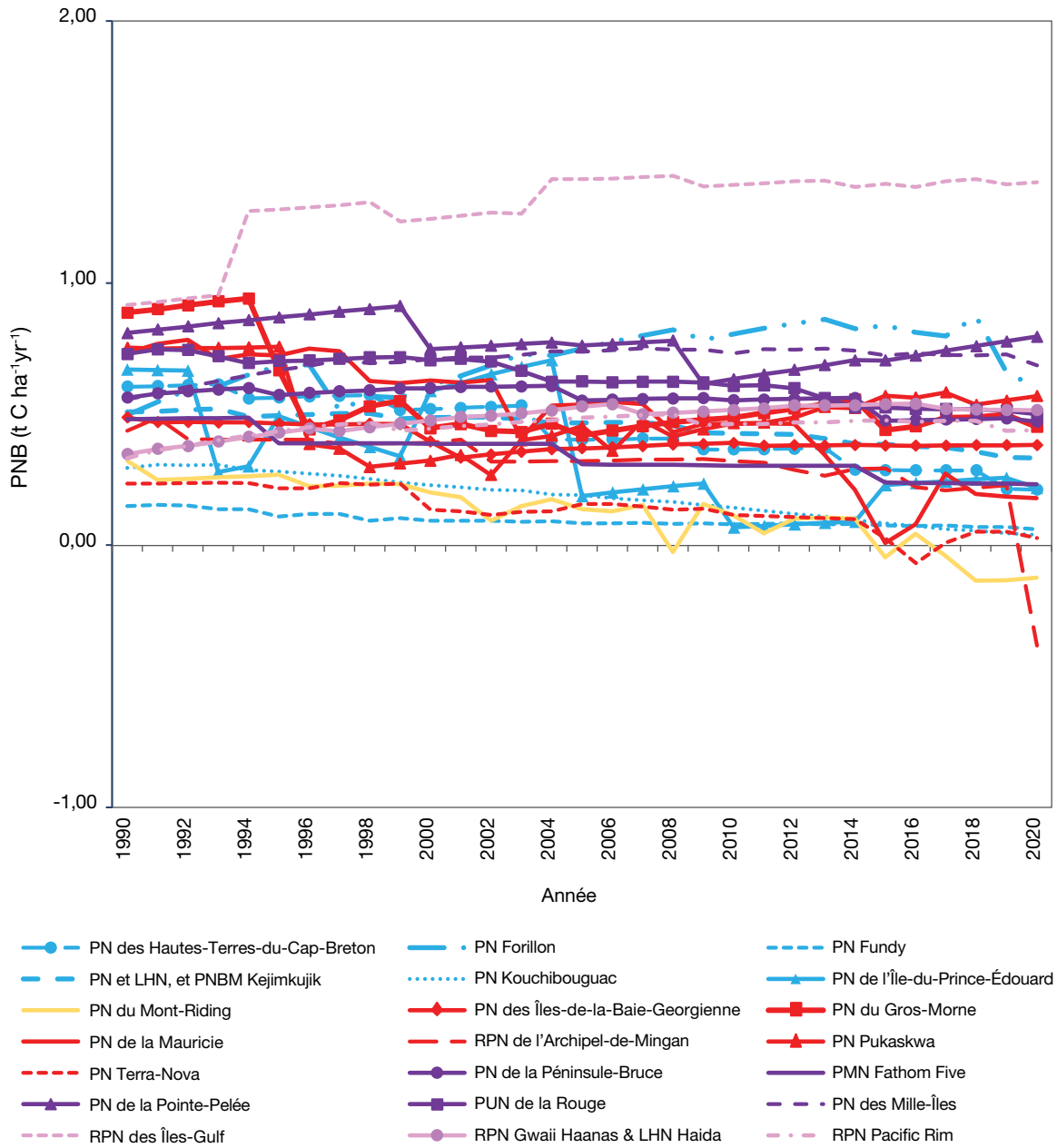


Figure 20a. Productivité nette du biome dans 21 parcs nationaux touchés par des perturbations peu fréquentes ou mineures au cours de la période de 1990 à 2020.

Les parcs sont codés par couleur selon l'écozone. Bleu – Maritime de l'Atlantique; Jaune – Plaines boréales; Orange – Bouclier boréal; Violet – Plaines à forêts mixtes; Rose – Maritime du Pacifique. Les valeurs positives de la PNB indiquent une augmentation des stocks de carbone de l'écosystème (puits de carbone nets) tandis que les valeurs négatives indiquent des pertes de carbone de l'écosystème (sources nettes de GES).

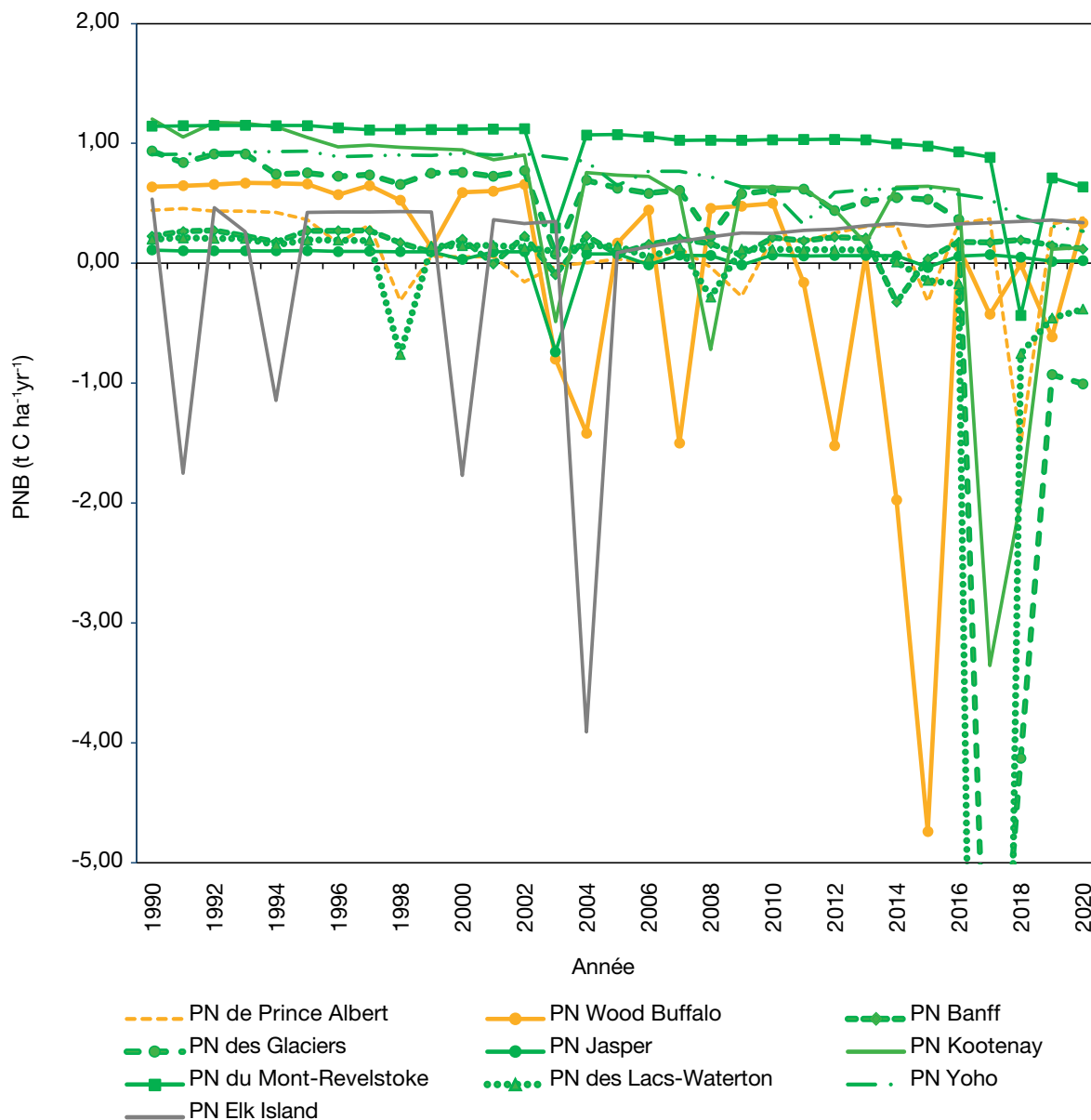


Figure 20b. Productivité nette du biome dans 10 parcs nationaux touchés par des perturbations fréquentes ou importantes au cours de la période de 1990 à 2020. Les parcs sont codés par couleur selon l'écozone. Jaune – Plaines boréales; Vert – Cordillère montagnarde; Gris – Prairies; les valeurs positives de la PNB indiquent une augmentation des stocks de carbone de l'écosystème (puits de carbone nets), tandis que les valeurs négatives indiquent des pertes de carbone de l'écosystème (sources nettes de GES).

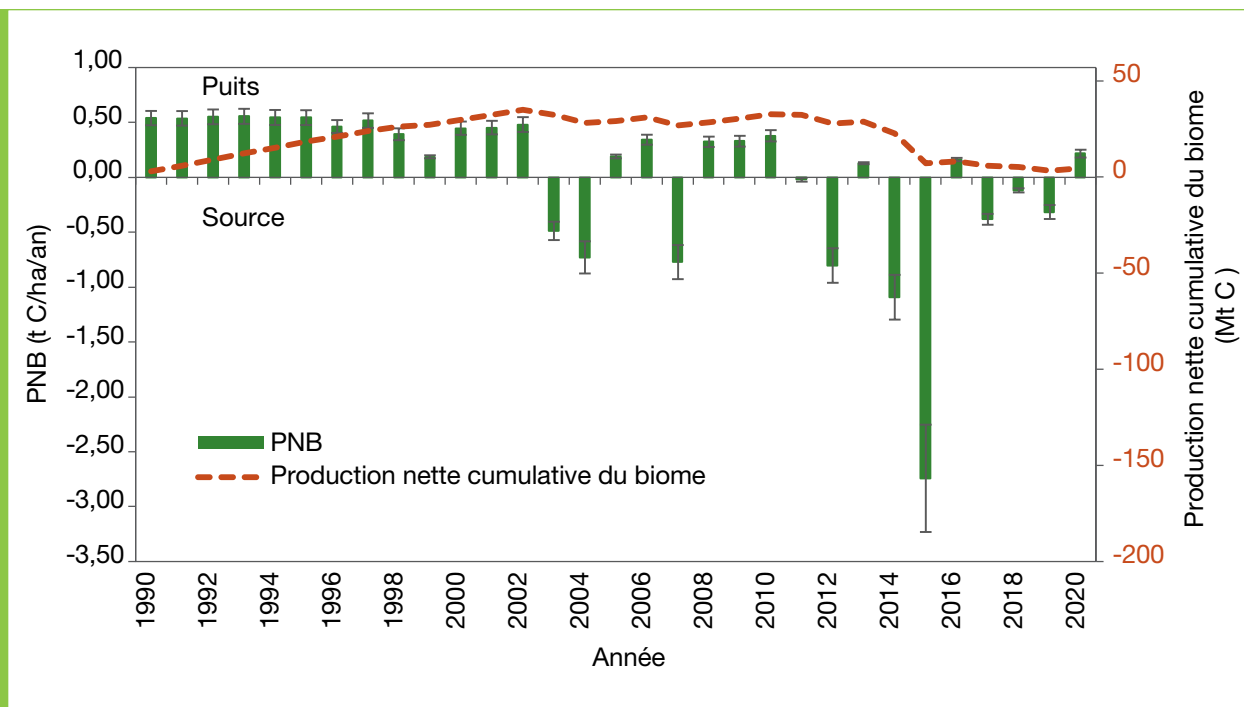


Figure 21. Variation annuelle de la PNB (axe de gauche) et de la PNB cumulative (axe de droite) pour les écosystèmes forestiers dans 31 parcs au cours de la période de 1990 à 2020.

3.2.4 Émissions de gaz à effet de serre

Bien que la PNB quantifie le gain ou la perte nette de carbone dans les émissions nettes de GES (bilan des GES) de l'écosystème, il s'agit de la mesure déclarée à l'échelle nationale conformément aux normes de déclaration du GIEC. Le bilan des GES tient compte du potentiel de réchauffement planétaire de chaque gaz à effet de serre, y compris le CO₂, le CH₄, le CO et le N₂O, émis par les processus naturels et les perturbations, et est déclaré en unités d'équivalents en dioxyde de carbone (éq. CO₂). Les valeurs négatives représentent les absorptions (puits) à partir de l'atmosphère et les valeurs positives représentent les émissions (sources) dans l'atmosphère.

Les écosystèmes forestiers de 28 parcs étaient des puits nets de GES au cours de la période de l'étude (figure 22). Les forêts du parc national Pukaskwa ont constitué le plus grand puits net de carbone (9,63 Mt d'éq. CO₂), absorbant en moyenne 0,31 Mt d'éq. CO₂ par année à partir de l'atmosphère, tandis que les forêts de la RPN des Îles-Gulf ont séquestré le plus de carbone par unité de surface forestière (4,74 t d'éq. CO₂ ha⁻¹ an⁻¹) (tableau 8). Les deux tiers des arbres de la forêt de la RPN des Îles-Gulf avaient moins de 50 ans en 1990, ce qui a contribué à son taux élevé de séquestration du carbone alors que la jeune forêt était dans sa période maximale d'absorption du carbone. De même, les deux tiers des arbres de la forêt du parc national

Pukaskwa avaient entre 50 et 70 ans en 1990. En raison de sa plus grande superficie, le parc national Pukaskwa a séquestré plus de carbone dans l'ensemble que la RPN des Îles-Gulf, même si son taux de séquestration était inférieur à celui de la RPN des Îles-Gulf.

Les écosystèmes forestiers de trois parcs étaient des sources nettes d'émissions de GES pendant la période de l'étude – le parc national Wood Buffalo, le parc national des Lacs-Waterton et le parc national Elk Island (figure 22). Le parc national Wood Buffalo représentait la source la plus importante, émettant en moyenne 2 Mt éq. CO₂ par année pendant la période à l'étude, tandis que le parc national des Lacs-Waterton émettait en moyenne plus de GES par unité de surface, soit 2,41 t éq. CO₂ par hectare par année, que le parc national Wood Buffalo (0,62 t éq. CO₂ ha⁻¹ an⁻¹) (tableau 8). En 31 ans, le parc national Wood Buffalo a émis environ 63 Mt d'éq. CO₂ de GES au total, tandis que le parc national des Lacs-Waterton a émis 2,5 Mt d'éq. CO₂, et le parc national Elk Island a rejeté 0,05 Mt d'éq. CO₂ de GES (tableau 8).

À l'échelle des écozones, les écosystèmes forestiers des parcs des plaines boréales étaient ensemble les plus grands émetteurs de GES, tandis que ceux des parcs du bouclier boréal séquestraient la plus grande quantité de carbone (figure 22). L'on pouvait s'y attendre puisque le parc national Wood Buffalo (la plus grande source) et le parc national Pukaskwa (le plus grand puits) représentent environ 60 % de la superficie de ces écozones, respectivement.

Dans l'ensemble, les forêts des parcs ont été un puits de carbone en 21 ans et une source nette de GES en 10 ans (c.-à-d. 2003, 2004, 2007, 2011, 2012, 2014, 2015, 2017, 2018, 2019) lorsqu'il y a eu d'importants feux de forêt dans 10 parcs (figure 23). À des intervalles de temps précis, la séquestration cumulative du carbone a augmenté dans les 31 parcs étudiés de 1990 à 2002, les forêts représentant un puits net d'environ 10 Mt éq. CO₂ par année. Entre 2003 et 2011, en raison de l'augmentation des perturbations naturelles, la séquestration du carbone et les émissions ont alterné au cours de cette période, et les forêts des parcs nationaux ont constitué une petite source nette de GES. Ils ont émis en moyenne 2,0 Mt d'éq. CO₂ par année au cours de cette période. Toutefois, de 2012 à 2020, ils ont été une source plus importante et ont émis en moyenne 12,9 Mt d'éq. CO₂ par année en raison de nouvelles augmentations des perturbations. Cumulativement, au cours de la période d'étude de 31 ans, les forêts des parcs nationaux ont constitué une source nette de 6,2 Mt éq. CO₂ de GES.

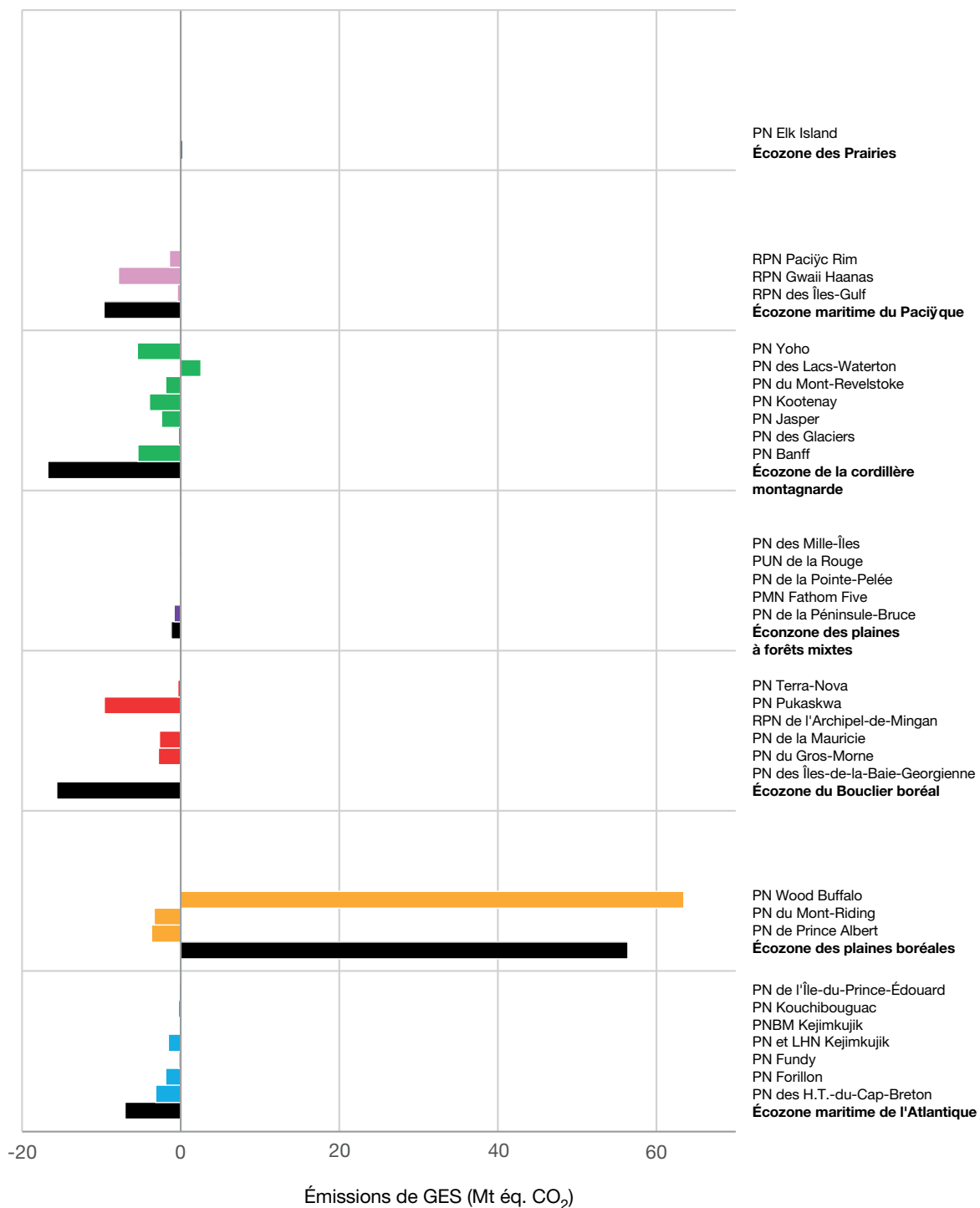


Figure 22. Émissions totales de GES (Mt eq. CO₂) provenant des écosystèmes forestiers, par parc et écozone, entre 1990 et 2020. Les parcs sont regroupés par écozone, et les noms des écozones sont en caractères gras. Les barres noires indiquent les émissions totales pour chaque écozone. Les valeurs négatives représentent les absorptions à partir de l'atmosphère et les valeurs positives représentent les émissions dans l'atmosphère.

Tableau 8. Émissions annuelles totales et moyennes de GES des écosystèmes forestiers dans 31 parcs nationaux

Écozone	Nom du parc	Émissions totales de GES (Mt éq. CO ₂)	Émissions annuelles de GES (t éq. CO ₂ an ⁻¹)	Émissions de GES par unité de surface (t éq. CO ₂ ha ⁻¹ an ⁻¹)
Maritime de l'Atlantique	PN des Hautes-Terres-du-Cap-Breton	-3,11	-100 172	-1,61
	PN Forillon	-1,89	-60 887	-2,60
	PN Fundy	-0,22	-6 938	-0,36
	PN et LHN Kejimikujik	-1,54	-49 787	-1,61
	PN Kouchibouguac	-0,26	-8 307	-0,68
	PN de l'Île-du-Prince-Édouard	-0,03	-913	-1,28
Plaines boréales	PN de Prince Albert	-3,69	-118 994	-0,34
	PN du Mont-Riding	-3,36	-108 238	-0,45
	PN Wood Buffalo	63,45	2 046 651	0,62
Bouclier boréal	PN des Îles-de-la-Baie-Georgienne	-0,05	-1 467	-1,49
	PN du Gros-Morne	-2,79	-89 879	-2,03
	PN de la Mauricie	-2,65	-85 562	-1,81
	RPN de l'Archipel-de-Mingan	-0,15	-4 909	-1,16
	PN Pukaskwa	-9,63	-310 722	-1,85
	PN Terra-Nova	-0,32	-10 462	-0,51
Plaines à forêts mixtes	PN de la Péninsule-Bruce	-0,84	-27 105	-2,05
	PMN Fathom Five	-0,05	-1 711	-1,28
	PN de la Pointe-Pelée	-0,02	-686	-2,84
	PUN de la Rouge	-0,14	-4 415	-2,33
	PN des Mille-Îles	-0,11	-3 545	-2,58
Cordillère montagnarde	PN Banff	-5,36	-172 837	-0,54
	PN des Glaciers	-0,32	-10 277	-0,27
	PN Jasper	-2,38	-76 865	-0,14
	PN Kootenay	-3,94	-127 009	-1,55
	PN du Mont-Revelstoke	-1,85	-59 762	-3,53
	PN des Lacs-Waterton	2,55	82 178	2,41
	PN Yoho	-5,47	-176 563	-2,66
Maritime du Pacifique	RPN des Îles-Gulf	-0,39	-12 572	-4,74
	RPN et site du patrimoine haïda Gwaii Haanas	-7,85	-253 307	-1,77
	RPN Pacific Rim	-1,39	-44 881	-1,66
Prairies	PN Elk Island	0,05	1 493	0,12
TOTAL		6,25	201 549	0,04

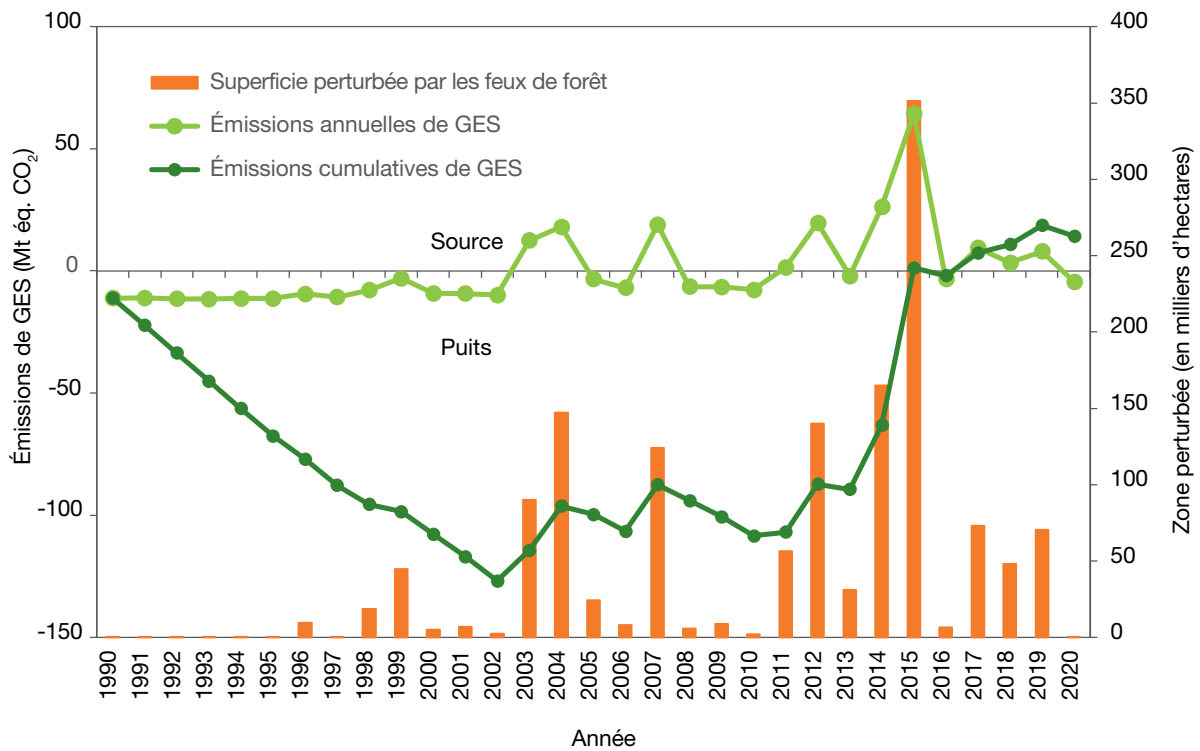


Figure 23. Émissions nettes annuelles et cumulatives de GES (Mt éq. CO₂) pour les écosystèmes forestiers et les zones touchées par les feux de forêt, pour les 31 parcs nationaux entre 1990 et 2020. Les valeurs négatives représentent les absorptions nettes de carbone atmosphérique, tandis que les valeurs positives représentent les émissions nettes de GES dans l’atmosphère.



Photo : M. Hamel / ©Parcs Canada / Parc national de la Mauricie

Chapitre 4 : Discussion

Dans cette étude, nous présentons les résultats du premier volume de la série d'Atlas du carbone de Parcs Canada, une série d'études visant à évaluer le stockage et la dynamique du carbone, dans la mesure du possible, des principaux écosystèmes présents dans les parcs nationaux du Canada. Cette étude est axée sur les écosystèmes forestiers de 31 parcs et comprend l'estimation des impacts des perturbations naturelles sur le stockage du carbone et les émissions de gaz à effet de serre (GES). Il sera question, ci-dessous, des stocks et de la densité de carbone, des flux de carbone et des émissions de GES, en tenant compte dans chaque cas de l'état et des tendances au cours de la période de 31 ans couverte par notre étude. Les limites potentielles de l'étude seront ensuite relevées, tout comme certaines conséquences des résultats sur la gestion des aires protégées et de conservation au Canada.

4.1 Répartition spatiale des stocks et des densités de carbone

Dans l'ensemble, la présente étude conclut que les forêts de 31 parcs nationaux du Canada contiennent une quantité estimée de 1 452 Mt de C, soit l'équivalent des émissions annuelles de 1,16 milliard de véhicules²⁰. Ce chiffre est inférieur aux 2 419 Mt C estimées par Kulshreshtha et coll. (2000), mais, cette estimation prenait en compte les réservoirs de carbone supplémentaires de 39 parcs nationaux partout au Canada et incluait d'autres écosystèmes tels que les prairies (biomasse végétale), les tourbières (biomasse végétale) et les régions relativement denses en carbone des parcs de l'Arctique (carbone du sol). Notre étude est axée sur les zones forestières tempérées et boréales méridionales, mais elle exclut les zones forestières situées dans les sept parcs nationaux du Yukon, des Territoires du Nord-Ouest et de Terre-Neuve-et-Labrador en raison d'un manque de données. L'inclusion de ces parcs septentrionaux aurait probablement augmenté nos estimations des stocks de carbone, mais on ne sait pas dans quelle mesure étant donné les différents facteurs biophysiques qui jouent sur les forêts dans ces écozones subarctiques.

La densité moyenne de carbone des forêts des 31 parcs nationaux évalués a été estimée à 258 t C ha⁻¹ en moyenne (de 150 à 477 t C ha⁻¹) sur l'ensemble des sites et des années de la période d'étude. Cette densité est supérieure à la densité moyenne de 170 t C ha⁻¹ estimée par Kulshreshtha et coll. (2000) pour les aires protégées au Canada. Cette disparité est probablement due à l'inclusion des réservoirs de carbone des prairies et des tourbières dans les calculs en plus des forêts, ainsi qu'à des données d'entrée incomplètes sur l'inventaire forestier et la couverture des terres, comme l'ont indiqué les auteurs. Notre estimation est également supérieure à l'estimation de 220 t C ha⁻¹ rapportée par Stinson et coll. (2011) pour les forêts aménagées au Canada pour la période de 1990 à 2008. Cette différence s'explique en grande partie par le fait que les parcs nationaux ne font pas l'objet d'une exploitation forestière à grande échelle et que, par conséquent, ils contiennent généralement des forêts plus anciennes et plus denses en carbone que les paysages environnants non protégés ou aménagés différemment.

Les estimations de la densité de carbone à l'échelle de l'écozone sont une autre indication de la densité de carbone forestier plus élevée dans les parcs nationaux que dans les forêts environnantes. Les densités de carbone pour les différents réservoirs pris en compte dans cette étude étaient semblables, mais systématiquement plus élevées que celles observées dans des recherches antérieures axées sur des paysages forestiers plus vastes englobant des aires protégées et diverses autres affectations des terres. Les densités totales de carbone de l'écosystème étaient semblables à celles établies dans des études précédentes dans l'écozone des plaines boréales (251 t C ha⁻¹ contre 230 t C ha⁻¹ estimées par Kurz et coll., 2013). Pour les parcs de l'écozone des plaines à forêts mixtes, les estimations de la densité de carbone de la biomasse aux présentes, soit de 45 à 64 t C ha⁻¹, correspondent à celles obtenues par Chen et coll. (2010),

20 Source : Calculateur d'équivalences de gaz à effet de serre de l'EPA, <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator> (en anglais seulement).

soit 52 t C ha⁻¹, pour toutes les forêts de l'Ontario en utilisant le modèle FORCARB. Enfin, les estimations rapportées ici de la densité de carbone du sol pour les écozones des plaines boréales et de l'est du bouclier boréal correspondent aux estimations précédemment rapportées pour les sols de la forêt boréale (93 t C ha⁻¹ par Jobbagy et Jackson, 2000; 96 t C ha⁻¹ par rapport à 86 t C ha⁻¹ par Stinson et coll., 2011). Comme pour les densités de carbone à l'échelle d'un parc ou d'un site, l'estimation faite ici, qui indique des densités de carbone plus élevées à l'échelle de l'écozone, est probablement due à l'absence d'exploitation et donc à l'inclusion de peuplements plus anciens et plus denses en carbone.

De grandes variations ont été observées dans les stocks et les densités de carbone forestier entre les différentes écozones, ce qui reflète les différences entre ces régions sur les plans de l'âge et du type de forêt, des caractéristiques du site et des régimes de perturbation. Les caractéristiques du site varient selon l'écozone et dépendent, aux échelles régionale et locale, de caractéristiques biophysiques relativement « définitives et durables », et des relations qui existent entre elles (Wiken et coll., 1996). Ces caractéristiques sont prises en compte dans la manière dont le Modèle générique du bilan du carbone (MGBC) simule la croissance et la productivité des forêts au fil du temps sur la base des données d'entrée fournies. Ainsi, l'écozone maritime du Pacifique se caractérise par des peuplements forestiers plus anciens, de longues saisons de croissance chaudes et humides, et des perturbations naturelles peu fréquentes, ce qui se traduit par une forte production de biomasse (Wiken et coll., 1996). Par conséquent, on y trouve la densité totale de carbone de l'écosystème estimée la plus élevée de toutes les écozones (ce que rapportent également Smithwick et coll., 2002; Sothe et coll., 2022; Stinson et coll., 2011; Trofymow & Blackwell, 1998; Trofymow et coll., 2008). Ces forêts anciennes avaient également la densité de carbone de la matière organique morte (MOM) la plus élevée (244 t C ha⁻¹). Les forêts de cette écozone, y compris les forêts pluviales tempérées côtières, montrent la plus grande production de racines et de litière de feuilles ainsi que la plus grande accumulation de débris ligneux grossiers par unité de surface, ce qui contribue à l'augmentation de la densité de carbone de la MOM. À l'inverse, les estimations de densités de biomasse et de carbone total de l'écosystème les plus faibles de toutes les écozones ont été obtenues pour les forêts des parcs nationaux de l'écozone des plaines à forêts mixtes. La densité de carbone de l'écosystème n'était que légèrement plus élevée pour les forêts des parcs de l'écozone maritime de l'Atlantique. Les parcs de ces deux écozones ont des sols relativement peu profonds et pauvres en nutriments qui limitent la croissance et la productivité de la végétation, ce qui se traduit par de faibles densités de biomasse (Wiken et coll., 1996) et de densité de carbone dans l'écosystème.

Dans les forêts étudiées, la proportion de carbone stocké dans les différents réservoirs varie selon les écozones, comme les tendances observées dans des études antérieures (p. ex., Stinson et coll., 2011) le laissaient présager. Cela s'explique principalement par les différences de régimes de perturbation entre les écozones. Les résultats obtenus pour les parcs de l'écozone maritime du Pacifique correspondent à ceux de recherches antérieures (Trofymow et Blackwell, 1998), qui estimaient des quantités de carbone total dans les réservoirs de biomasse forestière supérieures à la moyenne (c.-à-d. 44 %, par rapport à une moyenne de 28 % dans toutes les écozones évaluées) en raison de la rareté des perturbations naturelles. En revanche, nous avons trouvé des quantités de carbone inférieures à la moyenne (26 %) dans les réservoirs de biomasse

et supérieures à la moyenne (74 %) dans les réservoirs de MOM pour les parcs de l'écozone des plaines boréales. Les forêts de cette écozone ont été touchées plus fréquemment et plus largement par des perturbations naturelles que les forêts des parcs des autres écozones, ce qui a entraîné d'importants transferts de carbone de la biomasse vers les réservoirs de carbone de la MOM, dont plus de la moitié vers le carbone du sol.

4.2 Tendances temporelles des stocks et de la densité de carbone

Dans la plupart des zones forestières des parcs étudiés, les stocks de carbone ont augmenté régulièrement à un rythme lent. En effet, 29 des 31 parcs étudiés contiennent des stocks de carbone associés à l'écosystème forestier plus élevés en 2020 qu'en 1990. L'ampleur de l'augmentation des stocks de carbone est liée à l'âge des forêts et à l'importance des perturbations naturelles qui les touchent. Les forêts plus anciennes qui subissent moins de perturbations naturelles ont accumulé moins de carbone que les forêts plus jeunes. Ainsi, dans l'écozone maritime du Pacifique, la réserve de parc national (RPN) Pacific Rim, où l'âge médian des forêts était de 221 ans en 1990, a accumulé moins de carbone par hectare au cours de la période étudiée que les forêts de la RPN des Îles-Gulf, où l'âge médian était de 46 ans en 1990. De même, les forêts du parc national (PN) des Glaciers (âge médian de 164 ans en 1990), qui étaient les plus anciennes de l'écozone de la cordillère montagnarde, ont accumulé moins de carbone que les forêts des autres parcs de cette écozone. Sharma et coll. (2013) ont observé une tendance semblable entre l'âge de la forêt et les changements de la densité de carbone de l'écosystème au fil du temps dans leur étude de trois parcs en région montagneuse. Dans leur étude des forêts du nord-ouest de l'Amérique du Nord, Gray et coll. (2016) ont indiqué que la baisse du taux d'accumulation de carbone avec l'âge du peuplement était principalement due à l'augmentation des pertes de bois mort liées à la décomposition. Les résultats de la présente étude semblent confirmer cette constatation, l'augmentation des stocks de carbone au cours de la période étudiée étant relativement faible dans des parcs tels que le PN des Glaciers (âge médian de 164 ans en 1990), où les pertes par décomposition du bois mort étaient plus importantes, ce qui a presque équivalu à la séquestration du carbone dans ce parc au cours de ces années.

Contrairement aux 29 autres parcs, les stocks de carbone forestier du PN des Lacs-Waterton et du PN Wood Buffalo ont considérablement diminué au cours de la seconde moitié de la période étudiée. Ces diminutions sont associées à une augmentation de la fréquence des feux de forêt et de la superficie brûlée par les feux, ce qui a transformé les gains de stocks de carbone accumulés en pertes pour les écosystèmes forestiers. Plus de 16 000 hectares de forêt ont brûlé dans le PN des Lacs-Waterton en 2017, et plus de 1,3 million d'hectares dans le PN Wood Buffalo entre 2002 et 2020. Les émissions substantielles de GES dues à ces feux ont dépassé la séquestration de carbone estimée au cours de ces années, ce qui a entraîné une diminution nette du stock de carbone sur l'ensemble de la période étudiée. La diminution de la densité de carbone au fil du temps a été plus importante dans le PN des Lacs-Waterton, puisque 50 % de ses forêts ont brûlé en un an, contre 2 % par an dans le PN Wood Buffalo.

Si l'on calcule l'effet cumulatif de l'accumulation et des pertes de carbone dans tous les parcs faisant partie de la présente étude, on constate que les stocks globaux de carbone forestier ont augmenté dans les parcs au cours du premier tiers de la période étudiée (1990-2002) et sont restés plus ou moins constants de 2003 à 2011. Ils ont ensuite diminué pour atteindre, en 2020, un niveau légèrement supérieur à la valeur de 1990. Les écosystèmes forestiers des parcs nationaux étaient donc un puits de carbone pendant les 31 années évaluées (avec un gain de 6,8 Mt C au fil du temps), mais comme un nombre élevé de parcs subiront des perturbations de plus en plus importantes associées aux changements climatiques futurs (p. ex., Boulanger et coll., 2013), les forêts des parcs nationaux sont susceptibles de devenir une source de carbone.

4.3 Flux de carbone et émissions de GES

En plus des changements graduels dans les taux de respiration et de décomposition à mesure que les écosystèmes vieillissent, les perturbations sont à l'origine de changements majeurs ou soudains dans la dynamique du carbone forestier et des GES (p. ex., Giles-Hansen et Wei, 2022; Kurz et coll., 2008a). Dans les forêts des parcs nationaux du Canada, les résultats de la modélisation employée ont montré que les feux de forêt sont de loin le facteur le plus important pour déterminer si les parcs sont une source ou un puits net de GES, à la fois à l'échelle du site et de façon regroupée à l'échelle nationale. Les résultats obtenus indiquent en outre que les brûlages dirigés et les infestations d'insectes ont également contribué à modifier la dynamique du carbone forestier en causant des émissions directes et indirectes. Ces résultats sont cohérents avec de nombreuses études antérieures axées sur l'impact des perturbations sur les écosystèmes forestiers tempérés et boréaux (voir une revue de Thom et Seidl, 2016).

Les feux ont des répercussions importantes sur la dynamique du carbone non seulement parce qu'ils entraînent des pertes de carbone au cours de l'année où ils se produisent, mais aussi parce qu'ils ont un impact considérable sur la productivité des forêts et sur les émissions de carbone provenant de la décomposition de la MOM pendant les années qui suivent chaque feu. Ainsi, les forêts des parcs nationaux touchés par des feux de forêt présentaient une faible production nette des écosystèmes (PNE) l'année où le feu est survenu et plusieurs années après celui-ci (figure 18, courbe pour le PN Wood Buffalo, années 2015 à 2017) en raison de la PNE négative des peuplements touchés par le feu. La PNE du parc a ensuite augmenté lentement grâce à la régénération des peuplements forestiers après le feu, résultat correspondant à celui obtenu lors d'études antérieures (p. ex., Amiro et coll., 2010). Les feux de forêt qui se sont produits récemment (c.-à-d. après 2017) dans certains des parcs étudiés devraient jouer sur la dynamique du carbone pour ces sites pendant encore plusieurs années, d'abord en raison des émissions résultant de la décomposition de la biomasse brûlée, puis par l'augmentation de la séquestration du carbone grâce à l'établissement et à la croissance continue de jeunes arbres.

Au cours de la période étudiée, 28 parcs n'ont subi aucun feu entraînant le remplacement de peuplements, et ils sont donc devenus des puits de carbone nets au fil du temps. Néanmoins, plusieurs de ces parcs ont été des sources annuelles de carbone au cours des années où ils ont

été particulièrement touchés par d'importantes perturbations naturelles, ce qui montre bien l'effet de la variabilité interannuelle sur les flux de carbone et les émissions de GES à l'échelle du site dans la zone touchée par les perturbations naturelles.

En revanche, les forêts des parcs nationaux Wood Buffalo, des Lacs-Waterton et Elk Island ont été des sources nettes d'émissions de GES au cours de la période étudiée. Les émissions dues à des feux relativement fréquents et importants dans les forêts boréales du parc national Wood Buffalo ont fait de ce parc une source nette pendant plusieurs années. En revanche, les forêts de la Cordillère montagnarde du PN des Lacs-Waterton ont constitué un puits de carbone chaque année jusqu'en 2017, date à laquelle l'important feu de Kenow a entraîné une perte de forêt ponctuelle, mais significative, et de fortes émissions de GES, annulant ainsi les gains en carbone faits sur ce site au cours des décennies précédentes et transformant le parc en une source nette globale de GES à la fin de la période d'étude (voir la figure 23). En 2004, un seul grand feu de forêt survenu dans le parc national Elk Island, à la limite nord de l'écozone des prairies, a entraîné de fortes émissions de GES qui ont légèrement dépassé la quantité de carbone séquestré dans le parc au cours des autres années, faisant des forêts du parc national Elk Island une petite source nette de GES. Plusieurs auteurs ont déjà parlé du rôle de la suppression et de l'exclusion historiques des feux, des tendances des peuplements et d'autres changements à l'affectation des terres en tant que facteurs clés de la modification du régime naturel des feux dans les forêts tempérées et boréales du Canada (p. ex., McGee et coll., 2015; Wang et coll., 2022; White et coll., 2011). On sait maintenant que les changements climatiques contribuent également à modifier les régimes de perturbation des forêts (p. ex., les régimes des feux de forêt : voir Halofsky et coll., 2020 pour obtenir une évaluation propre au nord-ouest de l'Amérique du Nord; Seidl et coll., 2020 pour lire une analyse globale). Les conditions climatiques changeantes contribuent également à une diminution de la résilience des forêts en présence de perturbations (Forzieri et coll., 2022), mais, cette constatation est propre à chaque biome, les forêts boréales démontrant plutôt une augmentation de la résilience (voir également Johnstone et coll., 2010). Stevens-Rumann et coll. (2017) ont constaté que les changements climatiques nuisent à la régénération des forêts après les feux, et ont des impacts variés : déclin de la régénération, changements dans la composition et la densité des espèces, et conversion potentielle à des états non forestiers.

Pour obtenir une compréhension complète et détaillée de l'impact des feux sur la dynamique du carbone forestier, il faut disposer de données à petite échelle sur la gravité et le type de feux touchant les forêts étudiées (Wiedinmyer et Neff, 2007). Dans la présente étude, la gravité des feux de forêt a été maintenue constante parce qu'aucune donnée cohérente n'était disponible pour plusieurs parcs au fil du temps. Cela a entraîné des incertitudes dans les estimations des transferts de carbone et des émissions liées aux feux, ce qui a probablement entraîné une sous-estimation des émissions de GES au cours des années de violents feux de forêt. Malgré ce biais méthodologique, les émissions de deux parcs, le PN Wood Buffalo et le PN des Lacs-Waterton, ont dépassé à elles seules la séquestration combinée du carbone forestier des 29 autres parcs, de sorte que les forêts des parcs ont constitué une source nette de GES à l'échelle nationale au cours de la période d'étude de 31 ans. Les feux relativement récents dans les PN Wood Buffalo et des Lacs-Waterton mettent non seulement en évidence comment de grandes perturbations peuvent

transformer des parcs donnés en sources nettes de GES, mais aussi comment des perturbations dans un grand parc ou une grande région peuvent avoir un impact significatif sur le bilan des GES de tous les parcs nationaux combinés.

Les brûlages dirigés constituent une tactique de gestion des écosystèmes qui vise à résoudre les problèmes de santé des forêts et d'intégrité des écosystèmes causés par la suppression et l'interdiction historiques des feux, tout en réduisant les conditions propices aux feux de forêt graves susceptibles de nuire aux collectivités et aux infrastructures, ainsi que leur probabilité d'occurrence (Wang et coll., 2022; White et coll., 2011). Les brûlages dirigés dans les parcs étudiés ont également entraîné des émissions de GES, mais ils ne représentaient qu'environ 2 % des émissions totales de GES dues aux feux de forêt au cours de la période étudiée. Dans la modélisation employée, on a supposé une répartition égale des brûlages dirigés entre feux de surface et feux de cime. Bien que cette hypothèse soit valable pour certains parcs (V. Kafka, communication personnelle, août 2020), elle peut avoir entraîné une légère surestimation des émissions pour d'autres parcs, où les brûlages dirigés ont été presque exclusivement des feux de surface. Ainsi, ce biais méthodologique renforce la conclusion selon laquelle les brûlages dirigés effectués au cours de la période étudiée ont peu contribué au bilan du carbone global des forêts des parcs nationaux du Canada.

Les infestations d'insectes ont touché des secteurs relativement étendus (annexe F) et ont entraîné d'importants transferts de carbone de la biomasse vers les réservoirs de MOM en raison de la mortalité des arbres et de la décomposition qui s'ensuit (voir également Dymond et coll., 2010; Kurz et coll., 2008 b; Sharma et coll., 2013). Ces transferts vers les réservoirs de MOM peuvent conduire à des émissions de GES par la décomposition ou les feux de forêt au fil du temps (Raffa et coll., 2008; Sharma et coll., 2013). Néanmoins, les résultats obtenus indiquent que les infestations d'insectes, tout comme les brûlages dirigés pris en compte dans l'étude, ont entraîné de faibles émissions directes de GES par rapport aux feux de forêt. Deux facteurs pourraient avoir conduit à une sous-estimation des émissions de GES dues aux infestations d'insectes. Premièrement, bien que l'on ait pris en compte les 13 espèces d'insectes les plus susceptibles d'avoir un impact sur les forêts des parcs nationaux, de petits secteurs ont été touchés par d'autres insectes dans certains parcs, ce qui a donné lieu à des émissions non comptabilisées. Deuxièmement, aucune donnée utilisable sur la santé des forêts n'était disponible pour certains parcs (p. ex., PN des Hautes-Terres-du-Cap-Breton), ce qui a empêché de prendre en compte ces infestations dans notre simulation du MGBC pour ces sites. Cependant, comme chaque facteur n'a touché qu'une petite fraction de la superficie totale étudiée, leur impact combiné ne devrait avoir entraîné qu'une faible sous-estimation des émissions réelles résultant des infestations d'insectes. La conclusion selon laquelle ce sont les feux de forêt, et non les infestations d'insectes, qui ont été à l'origine de la dynamique du carbone et des émissions de GES dans les forêts des parcs nationaux du Canada entre 1990 et 2020 reste donc valable.

Les résultats obtenus mettent en évidence une distinction importante entre les flux de carbone des écosystèmes et les émissions de GES. Bien que la productivité nette des biomes (PNB) globale des forêts étudiées soit positive nette, ce qui indique qu'elles constituent un puits net

de carbone au fil du temps, leurs émissions de GES calculées en équivalent en CO₂ sur la même période ont porté à conclure que les forêts constituent une source nette de GES. En effet, les GES émis lors des feux de forêt comprennent des gaz autres que le CO₂, comme le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O), qui ont un potentiel de réchauffement planétaire beaucoup plus élevé que le CO₂. Ainsi, les émissions de GES dues aux grands feux de forêt dans le système étudié, calculées en équivalent en CO₂, sont plus élevées que la quantité de carbone séquestrée et enregistrée en tant que PNB.

La dynamique du carbone et des GES dans les écosystèmes forestiers peut donner des indications sur le rôle potentiel des aires protégées en tant que solutions naturelles pour l'atténuation des changements climatiques et sur la manière dont ce rôle peut varier dans l'espace et dans le temps. Collectivement, les forêts du réseau des parcs nationaux du Canada ont été une source nette d'émissions de GES au cours de la période 1990-2020. Toutefois, ce statut a évolué au fil du temps, passant d'un puits net de GES entre 1990 et 2002 à une alternance entre un petit puits net et une petite source nette entre 2003 et 2011, avant de devenir une source nette globalement plus importante par la suite. Un changement similaire a également été signalé pour certaines parties des forêts aménagées du Canada, par exemple la cordillère montagnarde, qui sont devenues des sources nettes de GES après 2002 (Kurz et coll., 2018). Dans les deux cas, le changement était principalement associé à des modifications à grande échelle des régimes de perturbations naturelles. Les forêts des parcs du Canada ont actuellement un potentiel réduit de contribution à la séquestration des GES à l'échelle nationale et mondiale, mais elles conservent tout de même leur rôle dans la prévention du rejet du carbone stocké à la suite de la conversion de l'affectation des terres. Des solutions de gestion forestière active, en particulier celles visant à restaurer les régimes naturels des feux propres à des écosystèmes et des sites donnés, doivent être élaborées afin de restaurer la capacité de séquestration des forêts des parcs et, par conséquent, leur plein potentiel en tant que solutions naturelles pour l'atténuation des changements climatiques.

4.4 Lacunes et orientations futures

Plusieurs facteurs peuvent jouer sur la précision des résultats obtenus dans cette étude : données d'entrée incomplètes, prise en compte limitée de plusieurs perturbations naturelles et de leurs interactions, limites et hypothèses du modèle, et impacts des changements climatiques sur la dynamique actuelle et future du carbone forestier qui n'ont pas été pris en compte. En ce qui concerne les données d'entrée, la simulation MGBC s'appuie sur des données relatives à l'inventaire forestier, au climat et aux perturbations cohérentes et complètes pour produire des estimations précises de la croissance et de la productivité des forêts. Ces exigences en matière de données ont limité la portée géographique de l'étude, car il y avait peu de données disponibles pour les régions septentrionales. L'analyse a donc été limitée aux parcs des latitudes méridionales du Canada, pour lesquels les données étaient plus facilement disponibles. Cela entraîne une lacune importante dans notre évaluation, car les forêts nordiques sont des écosystèmes riches en carbone qui connaissent des taux de réchauffement plus élevés que d'autres régions du Canada (Bush et Lemmen, 2019).

Notre étude s'est concentrée sur les principales perturbations dues aux feux et à certains insectes qui sont à l'origine des dynamiques des écosystèmes forestiers à l'échelle du paysage au Canada (voir une étude de McCullough et coll., 1998), et par conséquent de la dynamique du carbone de l'écosystème dans ces forêts (Kurz et coll., 2013). Des perturbations moins importantes causées par d'autres insectes, le vent, les phytopathogènes et la sécheresse entraînent aussi des pertes de carbone et peuvent se combiner pour causer des impacts cumulatifs engendrés par les perturbations naturelles sur les zones forestières (p. ex., Boucher et coll., 2018). Les résultats obtenus en matière de flux de carbone sous-estiment donc certainement les émissions réelles de GES des forêts étudiées. Ils montrent également la nécessité de prendre en compte les projections de la dynamique du carbone dans les parcs. La collecte et l'inclusion de données supplémentaires sur les différents types et l'étendue des perturbations naturelles à l'avenir, notamment la gravité des feux, permettront également une estimation plus précise des émissions.

Les résultats obtenus donnent des informations importantes sur la dynamique du carbone forestier dans les parcs nationaux du Canada, mais il convient de noter que la pleine incidence de la variabilité climatique sur cette dynamique n'a pas été directement évaluée dans le cadre de la présente étude. La simulation MGBC utilise des conditions climatiques moyennes constantes et n'est donc pas conçue pour prendre en compte la réponse des taux de croissance et de décomposition causée par les changements des régimes de température et de précipitations et par les augmentations continues de la concentration atmosphérique de CO₂ résultant des changements climatiques anthropiques. Ces contraintes ont probablement eu un effet sur les estimations modélisées de la variabilité interannuelle, de la répartition régionale et des tendances de la dynamique du carbone dans les écosystèmes (Kurz et coll., 2013). Il serait utile d'améliorer le MGBC pour tenir compte des changements des taux de croissance, de la composition des espèces et des perturbations causées par le climat afin d'améliorer son application en tant qu'outil dynamique de comptabilisation du carbone dans les écosystèmes.

La présente étude a examiné les changements historiques (1990-2020) des stocks de carbone et de la dynamique dans les régions forestières des parcs, mais elle n'a pas tenté d'évaluer les changements futurs des stocks et de la séquestration du carbone. On prévoit que les changements climatiques modifieront les régimes climatiques dans les aires protégées du monde entier (Dobrowski et coll., 2021; Elsen et coll., 2020). Ces nouvelles conditions climatiques devraient avoir un impact important sur la capacité des parcs nationaux à séquestrer le carbone, comme le montre une étude de Melillo et coll. (2016), qui prévoit une réduction de 40 % de la séquestration du carbone dans les aires protégées d'ici 2100 dans le cadre du scénario RCP8.5. Les changements climatiques prévus non seulement auront un impact direct sur la dynamique du carbone, mais aussi entraîneront des changements dans la croissance, la démographie et la composition des écosystèmes forestiers (McDowell et coll., 2020). Les changements climatiques devraient également intensifier les régimes de feux de forêt et d'autres perturbations à l'échelle du paysage au fil du temps (Descals et coll., 2022; Flannigan et coll., 2005), ce qui entraînerait de nouvelles augmentations des émissions de GES (Davis et coll., 2019; Halofsky et coll., 2020). Par conséquent, il est de plus en plus important de mieux comprendre les changements prévus dans les forêts en fonction des différents scénarios de changements climatiques afin de prévoir

les différentes répercussions directes et indirectes sur les stocks et la dynamique du carbone forestier. Ces connaissances permettront de déterminer le rôle potentiel des parcs en tant que solutions naturelles aux problèmes climatiques. Les données de référence et les analyses produites dans le cadre de notre étude pour la période 1990-2020 constituent un point de référence utile pour effectuer le suivi des répercussions futures des changements climatiques sur la dynamique du carbone dans le paysage forestier du Canada.

Comme c'est le cas pour la plupart des estimations régionales ou nationales du bilan carbone des écosystèmes, les stocks de carbone et la dynamique des écosystèmes forestiers calculés dans la présente étude sont difficiles à vérifier à de grandes échelles spatiales. La réalisation d'un échantillonnage *in situ* pour vérifier et valider ces estimations nécessiterait un programme d'échantillonnage et de suivi demandant beaucoup de ressources qui, à la connaissance des auteurs, n'existe actuellement ni au Canada ni ailleurs. Enfin, l'étude ne tient pas compte des émissions de GES évitées grâce à l'état de conservation des écosystèmes forestiers évalués, par exemple en limitant les changements à l'affectation des terres et à l'occupation du sol ou d'autres activités qui contribuent à des émissions importantes de carbone. Dans l'ensemble, ces lacunes peuvent contribuer à la sous-estimation de la contribution des aires protégées et de conservation à l'atténuation des changements climatiques.

4.5 Incidences sur la gestion

Les aires protégées demeurent un élément essentiel pour la conservation de la biodiversité et des services écosystémiques, et elles permettent la séquestration et le stockage du carbone, mais la présente étude montre que la protection des forêts dans les parcs nationaux ne garantit pas à elle seule le maintien de la séquestration du carbone dans le temps en tant que cobénéfice de la protection de la biodiversité. L'adoption de nouvelles approches intégrant les considérations relatives aux changements climatiques dans la planification, l'intendance et la gestion active des parcs sera importante si l'on veut atténuer les risques liés aux changements climatiques qui peuvent compromettre le rôle des forêts et des autres écosystèmes des parcs en tant que puits de carbone. Ces approches doivent être conçues pour gérer la conservation de la biodiversité et les changements climatiques de manière intégrée, comme le stipule la définition des « solutions fondées sur la nature » adoptée en mars 2022 par l'Assemblée des Nations Unies pour l'environnement (ANUE, 2022), et précédemment dans la Déclaration conjointe des aires protégées et conservées sur les crises des changements climatiques et de la perte de biodiversité (2021), signée par 26 gouvernements et organisations de conservation lors de la COP26 de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) (Agence Parcs Canada, 2021).

Les résultats spatialement explicites obtenus à l'échelle des sites peuvent éclairer les décisions de gestion active, les considérations relatives aux biens bâtis et aux infrastructures, et la planification de la conservation de la biodiversité afin de favoriser la conservation et la séquestration du carbone. Nos analyses ont permis de déterminer et de décrire la répartition

spatiale des stocks et des densités de carbone dans les différents parcs nationaux, et certains parcs présentent une variabilité spatiale modérée tandis que de nombreux autres présentent une grande variabilité, même sur des distances relativement courtes. Les cartes de carbone des écosystèmes (p. ex., figure 11) peuvent aider à établir où, dans un parc et dans le réseau des parcs, les activités de conservation et de restauration des écosystèmes ont le plus grand potentiel d'augmenter la séquestration du carbone et de réduire le risque de libérer le carbone stocké. De même, ces cartes peuvent contribuer à éclairer les décisions de gestion propres à un site donné, telles que l'emplacement de nouveaux biens bâtis et d'infrastructures en surface ou souterraines.

4.6 Résumé

Les solutions climatiques fondées sur la nature sont de plus en plus reconnues comme étant des approches importantes si l'on veut atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES, tant au Canada (Drever et coll., 2021) qu'à l'échelle mondiale (Griscom et coll., 2017). Les aires protégées en sont un élément important, mais jusqu'à présent, le rôle des aires protégées du Canada et des écosystèmes qui les composent en tant que solutions naturelles pour l'atténuation des changements climatiques n'a pas fait l'objet d'une évaluation complète. La présente étude a eu recours à un modèle de bilan de carbone, le MGCB, pour fournir les premières estimations complètes et des données spatialement explicites sur les stocks, les densités et les flux de carbone pour les écosystèmes forestiers dans les parcs nationaux partout au Canada et au fil du temps. Cette étude montre notamment les endroits et les moments associés à la dynamique du carbone des écosystèmes forestiers à des résolutions temporelles et spatiales fines pour les écosystèmes des aires protégées, et les réservoirs de carbone qui s'y trouvent, pour lesquels aucun rapport n'a encore été produit à l'échelle nationale. La connaissance de l'endroit et de la densité de ces stocks de carbone, ainsi que de leur dynamique temporelle, peut éclairer les décisions relatives à la gestion et à la restauration des écosystèmes, et permettre de préserver les grandes réserves naturelles de carbone ainsi que de contribuer à réduire les risques de pertes de carbone et d'émissions de GES dues aux perturbations naturelles et autres.

La présente étude montre que les forêts des parcs nationaux contiennent une quantité substantielle de carbone accumulé au cours des décennies et des siècles, mais que les changements dans les régimes de perturbation naturelle ont transformé ces forêts, dans certains secteurs, en une source nette d'émissions de GES au cours des dernières années. Cette conclusion souligne l'importance de prendre en compte les impacts futurs des changements climatiques sur la dynamique du carbone forestier dans les aires protégées, car les augmentations prévues de la gravité et de la fréquence des perturbations naturelles sont susceptibles de modifier encore davantage le bilan de carbone dans les parcs nationaux. Ces nouvelles connaissances comblent une lacune dans la compréhension collective des aires protégées en tant que solutions fondées sur la nature pour atténuer les effets des changements climatiques.

Cet historique de 31 ans du stockage et des flux de carbone forestier pour les parcs nationaux de tout le Canada répond à des questions essentielles qui permettront d'envisager l'inclusion du potentiel d'atténuation des aires protégées dans les contributions du Canada calculées à l'échelle nationale dans le cadre de l'Accord de Paris, et illustre les défis associés à la mesure de ces contributions d'une année à l'autre. Les conclusions de ce rapport, et d'autres rapports, appuieront les efforts du Canada dans le cadre de la CCNUCC, et alimenteront les discussions sur les inventaires nationaux de carbone et sur l'infrastructure et les données nécessaires pour surveiller et comptabiliser les émissions de GES des réseaux d'aires protégées, et pour en rendre compte. Parcs Canada continue de travailler avec des partenaires et des collaborateurs pour étudier en profondeur la dynamique du carbone dans d'autres écosystèmes, notamment les tourbières, les prairies et les écosystèmes côtiers dans les parcs nationaux, les lieux historiques nationaux et les aires marines nationales de conservation. Ces études permettront d'intégrer les flux de carbone et les émissions de GES associés aux écosystèmes forestiers dans un contexte plus vaste et plus complet. Elles montreront également le rôle important et dynamique que les aires protégées et les écosystèmes qui les composent peuvent jouer en tant que solutions naturelles pour l'atténuation des changements climatiques et, plus généralement, pour surmonter la double crise que constituent les changements climatiques et la perte de biodiversité.

Remerciements

Ces travaux n'auraient pu être réalisés sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes et organisations, ainsi que le soutien financier de Parcs Canada et de Ressources naturelles Canada. Nos remerciements à toutes les personnes suivantes :

Agence Parcs Canada

- Les spécialistes en géomatique, les écologistes et les autres membres du personnel de tous les parcs pour avoir fourni diverses données nécessaires au projet et répondu aux demandes de renseignements au sujet de ces ensembles de données.
- Peter Demontigny pour son soutien à la cartographie du SIG, et Alice Yue et Linda Dam pour son aide à la création de graphiques et de figures.
- Victor Kafka et Michel Theriault pour leurs conseils et suggestions sur l'utilisation des données sur les feux dans cette étude, et Lakmal Ratnayake pour avoir aidé à la compilation de ces données.
- Queenie Gray, qui a examiné l'ébauche initiale du rapport. Anna Lee-Carswell, Hilary Ta, Danielle Yetman, Michelle Macullo, et Rik Van Bogaert, qui ont examiné les versions subséquentes et appuyé les processus de révision et de traduction ainsi que le formatage du rapport.
- Scott Parker pour le soutien et les conseils en matière de réseautage sur le projet au cours de sa période initiale.
- Marlow Pellatt pour son expertise sur le carbone bleu et les observations et les commentaires fournis sur la première ébauche du présent rapport.
- Julia Thomas pour l'intervention directe au sein et à l'extérieur de l'Agence.

Gouvernement provincial

- Lane Gelhorn et Nancy Podbielski du ministère de l'Environnement de la Saskatchewan, Service des forêts, pour les courbes de rendement, la cartographie des écosites et les couches de défoliation des insectes pour le parc national de Prince Albert.
- James Steenberg, du ministère des Terres et des Forêts de la Nouvelle-Écosse, ainsi que Derek Gilby et James Bruce, du ministère des Ressources naturelles de la Nouvelle-Écosse [maintenant le ministère des Terres et des Forêts], pour l'inventaire des forêts, les données sur les insectes, les estimations de la courbe de rendement et d'autres types d'aide pour les données des parcs nationaux Kejimikujik et des Hautes-Terres-du-Cap-Breton.

- Antonio Viveiros de *Sustainable Development, Forestry and Peatlands* du Manitoba pour l'inventaire forestier, les courbes de rendement et d'autres formes d'aide pour le parc national du Mont-Riding.
- Ron Fournier de Ressources naturelles Canada pour les données sur les perturbations causées par les insectes dans les parcs de l'Ontario; Adam Hogg et Mike Vanderdoelen du ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario; Information sur les terres de l'Ontario pour les données sur les feux et les perturbations causées par les insectes dans les parcs de l'Ontario.
- Andrew Ing du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de l'Action climatique de l'Île-du-Prince-Édouard, Inventaire et modélisation des ressources, pour les courbes de rendement et les données sur la perturbation des insectes dans le parc national de l'Île-du-Prince-Édouard.

Groupe de travail chargé de la comptabilisation du carbone du Service canadien des forêts

- Mark Hafer, Eric Neilson, Benjamin Hudson, Byron Smiley, Mihai Voicu et Stephen Kull pour les ensembles de données et les explications sur le rendement, les scripts pour l'extraction des données et l'information sur le MGBC.
- Roger Brett pour l'ensemble de données compilé sur les perturbations causées par les insectes dans tous les parcs des montagnes.
- Mike Wulder et son équipe pour les données du produit *Composite2Change* sur les perturbations.
- Laurie McCormick pour l'aide à la recension des écrits.

Autres

- « Moja global » pour la maintenance de la plateforme FLINT de source ouverte qui héberge le MGBC et l'assistance connexe.
- Risa Smith, de l'Union internationale pour la conservation de la nature, pour avoir examiné l'ébauche et fourni des suggestions utiles.
- Florence Daviet, de la Société pour la nature et les parcs du Canada, pour avoir examiné l'ébauche et fourni des suggestions utiles.

Références

- Amiro, B. D., A. J. Barr, J.G. Barr, T. A. Black, R. Bracho, M. A. Brown, H. C. Chen, K. J. Clark, K. L. Davis, A. R. Desai, S. Dore, V. Engel, J. D. Fuentes, A. H. Goldstein, M. L. Goulden, T. Kolb, M. B. Lavigne, B. E. Law, H. A. Margolis, ... J. Q. Xiao. « Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America », *Journal of Geophysical Research*, 115, G00K02, 2010. <https://doi.org/10.1029/2010jg001390> (en anglais seulement)
- Amthor, J. S., V. H. Dale, N. T. Edwards, C. T. Garten, C. A. Gunderson, P. H. Hanson, M. A. Huston, A. W. King, R. J. Luxmoore, S. B. McLaughlin, G. Marland, P. J. Mulholland, R. J. Norby, E. G. O'Neill, R. V. O'Neill, W. M. Post, D. S. Shriener, D. E. Todd, T. J. Tschaplinski, ... S. D. Wullschlegler. *Terrestrial ecosystem responses to global change: a research strategy* (publication n° 4821), Oak Ridge National Laboratory, 1998. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub57658.pdf> (en anglais seulement)
- Assemblée des Nations Unies pour l'environnement. *Solutions fondées sur la nature à l'appui du développement durable* (résolution n° 5/5), Programme des Nations Unies pour l'environnement, 2 mars 2022. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/39865/NATURE-BASED%20SOLUTIONS%20FOR%20SUPPORTING%20SUSTAINABLE%20DEVELOPMENT.%20French.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Beaulne, J., M. Garneau, G. Magnan et É. Boucher. « Peat deposits store more carbon than trees in forested peatlands of the boreal biome », *Scientific Reports*, 11, 2657, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82004-x> (en anglais seulement)
- Boucher, D., Y. Boulanger, I. Aubin, P. Y. Bernier, A. Beaudoin, L. Guindon et S. Gauthier. « Current and projected cumulative impacts of fire, drought, and insects on timber volumes across Canada », *Ecological Applications*, 28(5), 2018, p. 1245–1259. <https://doi.org/10.1002/eap.1724> (en anglais seulement)
- Boulanger, Y., S. Gauthier, D. R. Gray, H. Le Goff, P. Lefort et J. Morissette. « Fire regime zonation under current and future climate over Eastern Canada », *Ecological Applications*, 23(4), 2013, p. 904–923. <https://doi.org/10.1890/12-0698.1> (en anglais seulement)
- Bremer, E. *Potential of rangelands to sequester carbon in Alberta*, Développement durable des ressources Alberta, 2008. <https://open.alberta.ca/publications/9780778582045> (en anglais seulement)
- Bush, E., et D. S. Lemmen (éditeurs). *Rapport sur le climat changeant du Canada*, Ressources naturelles Canada, 2019. <https://changingclimate.ca/CCCR2019/fr/>
- Campbell, A., L. Miles, I. Lysenko, A. Hughes et H. Gibbs, H. *Carbon storage in protected areas: Technical report*, Centre mondial de surveillance de la conservation de la nature du Programme des Nations Unies pour l'environnement, 2008. https://resources.unep-wcmc.org/products/WCMC_RT140 (en anglais seulement)

- Chapin, F. S., G. M. Woodwell, J. T. Randerson, E. B. Rastetter, G. M. Lovett, D. D. Baldocchi, D. Clark, M. E. Harmon, D. S. Schimel, R. Valentini, C. J. Wirth, J. L. Aber, J. Cole, M. L. Goulden, J. W. Harden, M. Heimann, R. W. Howarth, P. Matson, A. D. McGuire, ... E.-D. Schulze. « Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods », *Ecosystems*, 9, 2006, p. 1041–1050. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0105-7> (en anglais seulement)
- Chen, J., S. J. Colombo, M. T. Ter-Mikaelian et L. S. Heath. « Carbon budget of Ontario's managed forests and harvested wood products, 2001–2100 », *Forest Ecology and Management*, 259(8), 2010, p. 1385–1398. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.007> (en anglais seulement)
- Davis, K. T., S. Z. Dobrowski, P. E. Higuera, Z. A. Holden, T. T. Veblen, M. T. Rother, S. A. Parks, A. Sala et M. P. Maneta. « Wildfires and climate change push low-elevation forests across a critical climate threshold for tree regeneration », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(13), 2019, p. 6193–6198. <https://doi.org/10.1073/pnas.1815107116> (en anglais seulement)
- Descals, A., D. L. A. Gaveau, A. Verger, D. Sheil, D. Naito et J. Peñuelas. « Unprecedented fire activity above the Arctic Circle linked to rising temperatures », *Science*, 378(6619), 2022, p. 532–537. <https://doi.org/10.1126/science.abn9768> (en anglais seulement)
- Dobrowski, S. Z., C. E. Littlefield, D. S. Lyons, C. Hollenberg, C. Carroll, S. A. Parks, J. T. Abatzoglou, K. Hegewisch et J. Gage. « Protected-area targets could be undermined by climate change-driven shifts in ecoregions and biomes », *Communications Earth & Environment*, 2, 2021, p. 198. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00270-z> (en anglais seulement)
- Drever, C. R., S. C. Cook-Patton, F. Akhter, P. H. Badiou, G. L. Chmura, S. J. Davidson, R. L. Desjardins, A. Dyk, J. E. Fargione, M. Fellows, B. Filewod, M. Hession-Lewis, S. Jayasundara, W. S. Keeton, T. Kroeger, T. J. Lark, E. Le, S. M. Leavitt, M.-E. LeClerc, ... W. A. Kurz. « Natural climate solutions for Canada », *Science Advances*, 7(23), eabd6034, 2021. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd6034> (en anglais seulement)
- Durbin, J., et G. S. Watson. « Testing for serial correlation in least squares regression (III) », *Biometrika*, 58(1), 1971, p. 1–19. <https://doi.org/10.1093/biomet/58.1.1> (en anglais seulement)
- Dymond, C. C., E. T. Neilson, G. Stinson, K. Porter, D. MacLean, D. Gray, M. Campagna et W. A. Kurz. « Future spruce budworm outbreak may create a carbon source in eastern Canadian forests », *Ecosystems*, 13, 2010, p. 917–931. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9364-z> (en anglais seulement)
- Elsen, P. R., W. B. Monahan, E. R. Dougherty et A. M. Merenlender. « Keeping pace with climate change in protected areas », *Science Advances*, 6(25), eaay0814, 2020. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay0814> (en anglais seulement)

- Environnement et Changement climatique Canada. *Science du climat 2050 : Faire progresser la science et le savoir sur les changements climatiques*, 2020. https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/eccc/En4-414-2020-fra.pdf
- Flannigan, M. D., K. A. Logan, B. D. Amiro, W. R. Skinner et B. J. Stocks. « Future area burned in Canada », *Climatic Change*, 72, 2005, p. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-5935-y> (en anglais seulement)
- Forzieri, G., V. Dakos, N. G. McDowell, A. Ramdane et A. Cescatti, A. « Emerging signals of declining forest resilience under climate change », *Nature*, 608, 2022, p. 534–539. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04959-9> (en anglais seulement)
- Giles-Hansen, K., et X. Wei. « Cumulative disturbance converts regional forests into a substantial carbon source », *Environmental Research Letters*, 17(4), 044049, 2022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5e69> (en anglais seulement)
- Gray, A. N., T. R. Whittier et M. E. Harmon. « Carbon stocks and accumulation rates in Pacific Northwest forests: Role of stand age, plant community, and productivity », *Ecosphere*, 7(1), e01224, 2016. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1224> (en anglais seulement)
- Griscom, B. W., J. Adams, P. W. Ellis, R. A. Houghton, G. Lomax, D. A. Miteva, W. H. Schlesinger, D. Shoch, J. V. Siikamäki, P. Smith, P. Woodbury, C. Zganjar, A. Blackman, J. Campari, R. T. Conant, C. Delgado, P. Elias, T. Gopalakrishna, M. R. Hamsik, ... J. Fargione. « Natural climate solutions », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 2017, p. 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114> (en anglais seulement)
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. *Changements climatiques 2007 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, 2007. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, 2013. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*, Institute for Global Environmental Strategies, 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/index.html>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. *Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie*, 2003. Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf/french/full.pdf>

- Groupe de travail sur la formation du Centre interservices des feux de forêt du Canada Inc. *Glossaire canadien des termes employés en gestion des incendies forestiers*, Centre interservices des feux de forêt du Canada Inc., 2023. https://www.ciffc.ca/sites/default/files/2023-04/CIFFC_glossary_v2023-04-24-FR.pdf
- Halofsky, J. E., D. L. Peterson et B. J. Harvey. « Changing wildfire, changing forests: The effects of climate change on fire regimes and vegetation in the Pacific Northwest, USA », *Fire Ecology*, 16, 4, 2020. <https://doi.org/10.1186/s42408-019-0062-8> (en anglais seulement)
- Hermosilla, T., M. A. Wulder, J. C. White, N. C. Coops, G. W. Hobart et L. B. Campbell. « Mass data processing of time series Landsat imagery: Pixels to data products for forest monitoring », *International Journal of Digital Earth*, 9(11), 2016, p. 1035–1054. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1187673> (en anglais seulement)
- Jobbagy, E. G., et R. B. Jackson. « The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation », *Ecological Applications*, 10(2), 2000, p. 423–436. <https://doi.org/10.2307/2641104> (en anglais seulement)
- Johnstone, J. F., F. S. Chapin, T. N. Hollingsworth, M. C. Mack, V. Romanovsky et M. Turetsky. « Fire, climate change, and forest resilience in interior Alaska », *Canadian Journal of Forest Research*, 40(7), 2010, p. 1302–1312. <https://doi.org/10.1139/X10-061> (en anglais seulement)
- Kull, S. J., G. J. Rampley, S. Morken, J. M. Metsaranta, E. T. Neilson et W. A. Kurz. *Modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien (MBC-SFC3) à l'échelle opérationnelle, version 1.2 : guide de l'utilisateur*, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, 2019. https://publications.gc.ca/collections/collection_2016/rncan-nrcan/F0134-5-2016-fra.pdf
- Kulshreshtha, S. N., S. Lac, M. Johnston et C. Kinar. *Carbon sequestration in protected areas of Canada: an economic valuation* (Economic Framework Project, rapport n° 549), Conseil Canadien des Parcs, 2000. https://www.nswooa.ca/uploads/5/9/6/9/59690537/canadian_parks_council_carbon-sequestration-in-protected-areas-of-canada-an-economic-valuation.pdf
- Kurz, W. A., C. C. Dymond, G. Stinson, G. J. Rampley, E. T. Neilson, A. L. Carroll, T. Ebata et L. Safranyik. « Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change », *Nature*, 452, 2008b, p. 987–990. <https://doi.org/10.1038/nature06777> (en anglais seulement)
- Kurz, W. A., C. C. Dymond, T. M. White, G. Stinson, C. Shaw, G. J. Rampley, C. Smyth, B. Simpson, E. G. Neilson, J. A. Trofymow, J. M. Metsaranta et M. J. Apps. « CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards », *Ecological Modelling*, 220(4), 2009, p. 480–504. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018> (en anglais seulement)

- Kurz, W. A., C. H. Shaw, C. Boisvenue, G. Stinson, J. Metsaranta, D. Leckie, A. Dyk, C. Smyth et E. T. Neilson. « Carbon in Canada's boreal forest—A synthesis », *Environmental Reviews*, 21(4), 2013, p. 260–292. <https://doi.org/10.1139/er-2013-0041> (en anglais seulement)
- Kurz, W. A., G. Stinson, G. J. Rampley, C. C. Dymond et E. T. Neilson. « Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(5), 2008a, p. 1551–1555. <https://doi.org/10.1073/pnas.0708133105>
- Kurz, W. A., et M. J. Apps. « Developing Canada's National Forest Carbon Monitoring, Accounting and Reporting System to meet the reporting requirements of the Kyoto Protocol », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 2006, p. 33–43. <https://doi.org/10.1007/s11027-006-1006-6> (en anglais seulement)
- Kurz, W. A., S. Hayne, M. Fellows, J. D. MacDonald, J. M. Metsaranta, M. Hafer et D. Blain. « Quantifying the impacts of human activities on reported greenhouse gas emissions and removals in Canada's managed forest: Conceptual framework and implementation », *Canadian Journal of Forest Research*, 48(10), 2018, p. 1227–1240. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0176> (en anglais seulement)
- Kurz, W. A., S. J. Beukema et M. J. Apps. « Estimation of root biomass and dynamics for the carbon budget model of the Canadian forest sector », *Canadian Journal of Forest Research*, 26(11), 1996, p. 1973–1979. <https://doi.org/10.1139/x26-223> (en anglais seulement)
- Landsberg, J. J., et R. H. Waring. « A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning », *Forest Ecology and Management*, 95(3), 1997, p. 209–228. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00026-1) (en anglais seulement)
- Le Quéré, C., R. Moriarty, R. M. Andrew, G. P. Peters, P. Ciais, P. Friedlingstein, S. D. Jones, S. Sitch, P. Tans, A. Arneeth, T. A. Boden, L. Bopp, Y. Bozec, J. G. Canadell, L. P. Chini, F. Chevallier, C. E. Cosca, I. Harris, M. Hoppema,... N. Zeng. « Global carbon budget 2014 », *Earth System Science Data*, 7(1), 2015, p. 47–85. <https://doi.org/10.5194/essd-7-47-2015> (en anglais seulement)
- Masera, O., J. Garza-Caligaris, M. Kanninen, T. Karjalainen, J. Liski, G. Nabuurs, A. Pussinen, B. De Jong et G. M. J. Mohren. « Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach », *Ecological Modelling*, 164(2–3), 2003, p. 177–199. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(02\)00419-2](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(02)00419-2) (en anglais seulement)
- McCullough, D. G., R. A. Werner et D. Neumann. « Fire and insects in northern and boreal forest ecosystems of North America », *Annual Review of Entomology*, 43, 1998, p. 107–127. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.43.1.107> (en anglais seulement)

- McDowell N. G., C. D. Allen, K. Anderson-Teixeira, B. H. Aukema, B. Bond-Lamberty, L. Chini, J. S. Clark, M. Dietze, C. Grossiord, A. Hanbury-Brown, G. C. Hurtt, R. B. Jackson, D. J. Johnson, L. Kueppers, J. W. Lichstein, K. Ogle, B. Poulter, T. A. M. Pugh, R. Seidl, ..., C. Xu. « Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world », *Science*, 368(6494), eaaz9463, 2020. <http://doi.org/10.1126/science.aaz9463> (en anglais seulement)
- McGee, T., B. McFarlane et C. Tymstra. « Chapter 3–Wildfire: A Canadian perspective » dans J. F. Shroder, et D. Paton (éditeurs), *Wildfire hazards, risks and disasters*, Elsevier, 2015, p. 35–58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410434-1.00003-8> (en anglais seulement)
- Melillo, J. M., X. Lu, D. W. Kicklighter, J. M. Reilly, Y. Cai et A. P. Sokolov. « Protected areas' role in climate-change mitigation », *Ambio*, 45, 2016, p. 133–145. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0693-1> (en anglais seulement)
- Metherell, A. K., L. A. Harding, C. V. Cole et W. J. Parton. *CENTURY Soil Organic Matter Model Environment, Technical Documentation, Agroecosystem Version 4.0* (Rapport technique n° 4), Great Plains System Research Unit, Colorado State University, 1993. https://www.nrel.colostate.edu/projects/century/manual/html_manual/man96.html (en anglais seulement)
- Moran, P. A. P. « Notes on continuous stochastic phenomena », *Biometrika*, 37(1–2), 1950, p. 17–23. <https://doi.org/10.2307/2332142> (en anglais seulement)
- Morton, C. J., R. Cameron et P. Duinker. « Modeling carbon budgets in four protected wilderness areas in Nova Scotia », dans S. Bondrup-Nielsen, K. Beazley, G. Bissix, D. Colville, S. Flemming, T. Herman, M. McPherson, S. Mockford et S. O'Grady (éditeurs), *Ecosystem based management: Beyond boundaries. Proceedings of the Sixth International Conference of Science and the Management of Protected Areas, 21–26 May 2007, Acadia University, Wolfville, Nova Scotia*, Science and Management of Protected Areas Association, 2007, p. 429–440.
- Nabuurs, G.-J., M.-J. Schelhaas et A. Pussinen. « Validation of the European Forest Information Scenario Model (EFISCEN) and a projection of Finnish forests », *Silva Fennica*, 34(2), 638, 2000. <https://doi.org/10.14214/sf.638> (en anglais seulement)
- Parcs Canada. *Parcs Canada et des aires protégées et conservées du monde entier signent la toute première déclaration commune sur le changement climatique et la biodiversité* [Communiqué de presse], 5 novembre 2021. <https://www.canada.ca/fr/parcs-canada/nouvelles/2021/11/parcs-canada-et-des-aires-protégees-et-conservees-du-monde-entier-signent-la-toute-premiere-declaration-commune-sur-le-changement-climatique-et-la-.html>
- Pan, Y., R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch et D. Hayes. « A large and persistent carbon sink in the world's forests », *Science*, 333(6045), 2011, p. 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609> (en anglais seulement)

- Raffa, K. F., B. H. Aukema, B. J. Bentz, A. L. Carroll, J. A. Hicke, M. G. Turner et W. H. Romme. « Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: The dynamics of bark beetle eruptions », *BioScience*, 58(6), 2008, p. 501–517. <https://doi.org/10.1641/B580607> (en anglais seulement)
- Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts. *L'état des forêts du Canada : rapport annuel 2020*, 2020. <https://d1ied5g1xfpx8.cloudfront.net/pdfs/40220.pdf>
- Running, S. W., et S. T. Gower. « FOREST-BGC, A general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets », *Tree Physiology*, 9(1–2), 1991, p. 147–160. <https://doi.org/10.1093/treephys/9.1-2.147> (en anglais seulement)
- Seidl, R., J. Honkaniemi, T. Aakala, A. Aleinikov, P. Angelstam, M. Bouchard, Y. Boulanger, P. J. Burton, L. De Grandpré, S. Gauthier, W. D. Hansen, J. U. Jepsen, K. Jõgiste, D. Kneeshaw, T. Kuuluvainen, O. V. Lisitsyna, K. Makoto, A. Mori, D. S. Pureswaran, ... C. Senf. « Globally consistent climate sensitivity of natural disturbances across boreal and temperate forest ecosystems », *Ecography*, 43(7), 2020, p. 967–978. <https://doi.org/10.1111/ecog.04995> (en anglais seulement)
- Sharma, T., W. A. Kurz, G. Stinson, M. G. Pellatt et Q. Li. « A 100-year conservation experiment: Impacts on forest carbon stocks and fluxes », *Forest Ecology and Management*, 310, 2013, p. 242–255. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.048> (en anglais seulement)
- Smithwick, E. A. H., M. E. Harmon, S. M. Remillard, S. A. Acker et J. F. Franklin. « Potential upper bounds of carbon stores in forests of the Pacific Northwest », *Ecological Applications*, 12(5), 2002, p. 1303–1317. <https://doi.org/10.2307/3099973> (en anglais seulement)
- Sothe, C., A. Gonsamo, J. Arabian, W.A. Kurz, S.A. Finkelstein et J. Snider, « Large Soil Carbon Storage in Terrestrial Ecosystems of Canada », *Global Biogeochemical Cycles*, 36(2), e2021GB007213, 2022. <https://doi.org/10.1029/2021gb007213> (en anglais seulement)
- Stevens-Rumann, C. S., K. B. Kemp, P. E. Higuera, B. H. Harvey, M. T. Rother, D. C. Donato, P. Morgan et T. T. Veblen. « Evidence for declining forest resilience to wildfires under climate change », *Ecology Letters*, 21(2), 2018, p. 243–252. <https://doi.org/10.1111/ele.12889> (en anglais seulement)
- Stinson, G., W. A. Kurz, C. Smyth, E. G. Neilson, C. C. Dymond, J. M. Metsaranta, C. Boisvenue, G. J. Rampley, Q. J. Li, T. M. White et D. Blain. « An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008 », *Global Change Biology*, 17(6), 2011, p. 2227–2244. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02369.x> (en anglais seulement)

- Tarnocai, C., J. G. Canadell, E. A. G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova et S. Zimov. « Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region », *Global Biogeochemical Cycles*, 23(2), GB2023, 2009. <https://doi.org/10.1029/2008gb003327> (en anglais seulement)
- Thom, D., et R. Seidl. « Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests », *Biological Reviews*, 91(3), 2016, p. 760–781. <https://doi.org/10.1111/brv.12193> (en anglais seulement)
- Tian, H., J. M. Melillo, D. W. Kicklighter, A. D. McGuire et J. Helfrich. « The sensitivity of terrestrial carbon storage to historical climate variability and atmospheric CO₂ in the United States », *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 51(2), 1999, p. 414–452. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v51i2.16318> (en anglais seulement)
- Trofymow, J. A., et B. A. Blackwell. « Changes in ecosystem mass and carbon distributions in coastal forest chronosequences », *Northwest Science*, 72(2), 1998, p. 40–42. <https://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/5091.pdf> (en anglais seulement)
- Trofymow, J. A., G. Stinson et W. A. Kurz. « Derivation of a spatially explicit 86-year retrospective carbon budget for a landscape undergoing conversion from old-growth to managed forests on Vancouver Island, BC », *Forest Ecology and Management*, 256(10), 2008, p. 1677–1691. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.02.056> (en anglais seulement)
- United States Global Change Research Program. *Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A sustained assessment report*, 2018. <https://doi.org/10.7930/SOCCR2.2018> (en anglais seulement)
- Wang, W., W. Wu, F. Guo et G. Wang. « Fire regime and management in Canada’s protected areas », *International Journal of Geoheritage and Parks*, 10(2), 2022, p. 240–251. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.04.003> (en anglais seulement)
- White, C. A., D. D. B. Perrakis, V. G. Kafka et T. Ennis. « Burning at the edge: Integrating biophysical and eco-cultural fire processes in Canada’s parks and protected areas », *Fire Ecology*, 7, 2011, p. 74–106. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0701074> (en anglais seulement)
- Wiedinmyer, C., et J. C. Neff. « Estimates of CO₂ from fires in the United States: Implications for carbon management », *Carbon Balance and Management*, 2, 10, 2007. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-2-10> (en anglais seulement)
- Wiken, E. B., D. Gauthier, I. Marshall, K. Lawton et H. Hirvonen. *A perspective on Canada’s ecosystems: An overview of the terrestrial and marine ecozones* (document hors-série n° 14), Conseil canadien des aires écologiques, 1996. https://ccea-ccae.org/wp-content/uploads/2015/10/P14_A-perspective-on-Canadas-Ecosystems.pdf (en anglais seulement)

Glossaire

Terme	Description
Absorption (du CO ₂ ou des GES)	Retrait de l'atmosphère d'un GES ou d'un précurseur de GES par un puits (GIEC, 2013, annexe III).
Atténuation (des changements climatiques)	Intervention humaine visant à réduire les sources ou à accroître les puits de gaz à effet de serre (GIEC, 2013, annexe III).
Bilan de carbone	Équilibre des échanges (absorption et rejet) de carbone entre les réservoirs de carbone dans le cycle du carbone.
Bilan net de carbone de l'écosystème (BNCE)	Taux net d'accumulation de carbone dans les écosystèmes (ou de perte attribuable aux écosystèmes [signe négatif]). Le BNCE représente le bilan global du carbone de l'écosystème provenant de toutes les sources et de tous les puits : physiques, biologiques et anthropiques (Chapin et coll., 2006).
Billes de sciage	Bûches d'un diamètre particulier qui peuvent être utilisées pour la production de bois d'œuvre. En revanche, le bois de chauffage peut être de n'importe quel diamètre.
Biomasse	Masse de la végétation forestière vivante, qui comprend les arbres de taille marchande et de taille inférieure à la taille marchande, ventilée par composants : bois de tige marchand, feuillage, racines grossières et fines, et autres (cimes, souches et arbres de taille inférieure à la taille marchande; Kull et coll., 2019).
Brûlage dirigé	Feu utilisé délibérément dans un secteur prédéterminé conformément à des directives précises et approuvées pour atteindre des objectifs prédéterminés (Groupe de travail sur la formation du Centre interservices des feux de forêt du Canada Inc. [GTF du CIFFC], 2023).
Carbone du sol	Carbone se trouvant dans le sol, y compris les diverses formes de carbone organique et inorganique retrouvées dans le sol ainsi que le charbon, mais sans inclure la biomasse du sol comme les racines et les organismes vivants (Kull et coll., 2019).
Densité de carbone de l'écosystème	Masse de carbone par unité de surface (densité de carbone) contenue dans la biomasse et les réservoirs de matière organique morte.

Terme	Description
Dioxyde de carbone (CO ₂)	Gaz d'origine naturelle ou résultant de la combustion de combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon, etc.) provenant de gisements de carbone fossile; de la combustion de la biomasse; des changements d'affectation des terres; et des processus industriels (p. ex., production de ciment). C'est le principal gaz à effet de serre anthropique qui joue sur l'équilibre radiatif de la Terre. C'est aussi le gaz de référence pour la mesure des autres gaz à effet de serre. Son potentiel de réchauffement planétaire est donc égal à 1 (Global Change Research Program des États-Unis [USGCRP], 2018, Section G).
Échange net de l'écosystème (ENE)	Échange net de CO ₂ avec l'atmosphère, c'est-à-dire le flux vertical et latéral de CO ₂ de l'écosystème vers l'atmosphère. Il diffère de la PNE puisqu'il est de signe contraire et inclut des flux de CO ₂ non respiratoires tels que ceux dus provenant du feu. Les valeurs positives représentent le carbone rejeté dans l'atmosphère (c.-à-d. une source) et les valeurs négatives désignent l'absorption de carbone (c.-à-d. un puits; Chapin et coll., 2006).
Équivalent en dioxyde de carbone (éq. CO ₂)	Mesure utilisée pour comparer différents gaz à effet de serre en fonction de leur contribution au forçage radiatif. La CCNUCC utilise les potentiels de réchauffement planétaire (PRP) comme facteurs de calcul de l'équivalent en dioxyde de carbone (GIEC, 2006, glossaire).
Feu de cime	Feu qui brûle en progressant dans la couche de combustible de la cime des arbres, le plus souvent simultanément à un feu de surface (Centre interservices des feux de forêt du Canada Inc. (GTF du CIFFC, 2023).
Feu de surface	Feu qui brûle le combustible de surface, mais qui n'atteint pas la cime des arbres, comme un feu de devant, un feu de flanc ou un contre-feu (GTF du CIFFC, 2023).
Flux	Direction et taux de transfert du carbone entre les réservoirs (USGCRP, 2018, Section G).
Forêts aménagées	Comprennent les forêts aménagées à des fins de récolte, celles qui font l'objet de gestion des feux ou d'infestations d'insectes ainsi que les forêts protégées, comme les forêts que l'on trouve dans les parcs nationaux et provinciaux. La superficie des forêts aménagées au Canada est de 226 millions d'hectares. La superficie forestière qui reste est considérée comme « non aménagée » (Ressources naturelles Canada et Service canadien des forêts, 2020).

Terme	Description
Gaz à effet de serre (GES)	Constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement terrestre émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'effet de serre. La vapeur d'eau (H ₂ O), le dioxyde de carbone (CO ₂), l'oxyde nitreux (N ₂ O), le méthane (CH ₄) et l'ozone (O ₃) sont les principaux GES présents dans l'atmosphère terrestre. Il existe également des GES résultat uniquement des activités humaines, tels que les hydrocarbures halogénés et d'autres substances contenant du chlore et du brome, dont traite le Protocole de Montréal. Outre le CO ₂ , le N ₂ O, et le CH ₄ , le Protocole de Kyoto traite, quant à lui, d'autres GES tels que l'hexafluorure de soufre (SF ₆), les hydrurofluorurocarbones (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC; GIEC, 2013, annexe III).
Matière organique morte (MOM)	Terme générique désignant l'ensemble des substances organiques mortes de l'écosystème, y compris les arbres morts debout, les arbres tombés, les débris ligneux grossiers et fins, la litière, le carbone du sol et la tourbe (Kull et coll., 2019).
Matrice des perturbations (MP)	Matrice définissant la proportion de chaque réservoir de biomasse et de MOM qui est transférée vers d'autres réservoirs, vers l'atmosphère et vers le secteur des produits forestiers au moment d'une perturbation, en fonction du type de perturbation et de l'écozone terrestre (Kull et coll., 2019).
Potentiel de réchauffement planétaire (PRP)	Indice qui mesure la quantité d'énergie qu'une tonne (métrique) de gaz à effet de serre absorbera et rejettera par la suite au cours d'une période donnée. Les potentiels de réchauffement des GES sont normalisés par rapport au forçage radiatif du CO ₂ , dont le PRP est de 1. La période habituellement utilisée pour le calcul des PRP est de 100 ans, ce qui comprend les effets combinés des GES dans l'atmosphère au cours de leur durée de vie (USGCRP, 2018, section G).
Production primaire brute (PPB)	Absorption brute de dioxyde de carbone par la photosynthèse (USGCRP, 2018, Section G).
Productivité (ou production) nette de l'écosystème (PNE)	Productivité primaire nette moins toutes les pertes de carbone dues à la décomposition.

Terme	Description
Productivité (ou production) nette du biome (PNB)	Bilan net de carbone de l'écosystème (BNCE) estimé à de grandes échelles temporelles et spatiales (Chapin et coll., 2006). On l'estime en soustrayant à la PNE les pertes de carbone causées par les perturbations (p. ex., les feux), la récolte et le défrichage lié au changement d'affectation des terres. C'est l'équivalent de la variation annuelle totale du stock de carbone de l'écosystème. Si le bilan carbone de l'écosystème entraîne une absorption nette de l'atmosphère (PNB positive), l'écosystème est considéré comme un puits de carbone; si le bilan produit des émissions nettes dans l'atmosphère (PNB négative), l'écosystème est considéré comme une source de carbone.
Productivité (ou production) primaire nette (PPN)	Absorption nette de dioxyde de carbone par les végétaux grâce à une production primaire brute supérieure aux pertes causées par la respiration des végétaux (autotrophe) (USGCRP, 2018, Section G).
Puits	Tout processus, toute activité ou tout mécanisme qui élimine de l'atmosphère un GES, un aérosol ou un précurseur de GES (GIEC, 2013, annexe III).
Qualité du site	Mesure de la productivité d'un site, souvent exprimée sous forme d'indice du site, définie comme la hauteur moyenne à un âge fixe (habituellement 50 ans à hauteur de poitrine) atteinte par les arbres dominants et codominants du site pour une espèce donnée.
Réservoir	Compartiment dans le système terrestre où le carbone peut être absorbé, stocké ou rejeté dans le cadre d'un bilan de carbone (USGCRP, 2018, section G).
Respiration autotrophe	Respiration des organismes photosynthétiques (p. ex., plantes et algues; GIEC, 2013, annexe III).
Respiration hétérotrophe (R_h)	Conversion de la matière organique (dans la litière, le bois mort et les sols) en dioxyde de carbone par des organismes autres que les plantes et les algues (GIEC, 2013, annexe III).
Séquestration	Stockage du carbone par des processus naturels, délibérés ou technologiques dans le cadre desquels le dioxyde de carbone est détourné des sources d'émission ou absorbé de l'atmosphère et stocké biologiquement dans les environnements océaniques et terrestres (p. ex., végétation, sols et sédiments) ou dans des formations géologiques (USGCRP, 2018, Section G).
Stock	Masse de carbone contenue dans un réservoir particulier du système terrestre (USGCRP, 2018, Section G).
Volume marchand	Somme du volume des tiges des arbres d'un diamètre à hauteur de poitrine supérieur à une certaine valeur (1,3 m). Le seuil du diamètre varie selon les régions du Canada.

Annexe A : Noms scientifiques des insectes forestiers

Nom commun	Nom scientifique
Noctuelle décolorée	<i>Enargia decolor</i>
Dendroctone du Douglas	<i>Dendroctonus pseudotsugae</i>
Arpenteuse de la pruche	<i>Lambdina fiscellaria</i>
Dendroctone du mélèze	<i>Dendroctonus simplex</i>
Agrile du frêne	<i>Agrilus planipennis</i>
Spongieuse européenne	<i>Lymantria dispar</i>
Livrée des forêts	<i>Malacosoma disstria</i>
Tordeuse du tremble	<i>Choristoneura conflictana</i>
Dendroctone du pin ponderosa	<i>Dendroctonus ponderosae</i>
Tordeuse des bourgeons de l'épinette	<i>Choristoneura fumiferana</i>
Tordeuse bisannuelle de l'épinette	<i>Choristoneura biennis</i>
Scolyte du sapin de l'ouest	<i>Dryocoetes confusus</i>
Tordeuse à tête noire de l'Ouest	<i>Acleris gloverana</i>

Annexe B : Matrices des perturbations pour les brûlages dirigés (cime) et le dendroctone du pin ponderosa (très grave)

Brûlages dirigés (cime)

Source ^a	Puits ^a (proportion de carbone transférée)																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
1	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,81	0,01	0,08	-	-	
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	-	-	-	-	-	0,22	0	0,02	-	-	
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	-	-	-	-	-	0,22	0	0,02	-	-	
5	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	-	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,81	0,01	0,08	-	-	
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,81	0,01	0,08	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,71	0,01	0,07	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	

^a Source ^b – valeur nulle

Dendroctone du pin ponderosa (très grave)

Source ^a	Puits ^a (proportion de carbone transférée)																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	0,5	^b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	0,25	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-

^a Source ^a Puits ^b – valeur nulle

Rangée	Description	Colonne	Description
1	Résineux marchands	1	Résineux marchands
2	Feuillage de résineux	2	Feuillage de résineux
3	Résineux - Autre	3	Résineux - Autre
4	Résineux marchands secondaires	4	Résineux marchands secondaires
5	Racines grossières de résineux	5	Racines grossières de résineux
6	Radicelles de résineux	6	Radicelles de résineux
7	Feuillus marchands	7	Feuillus marchands
8	Feuillage de feuillus	8	Feuillage de feuillus
9	Feuillus - Autre	9	Feuillus - Autre
10	Feuillus marchands secondaires	10	Feuillus marchands secondaires
11	Racines grossières de feuillus	11	Racines grossières de feuillus
12	Radicelles de feuillus	12	Radicelles de feuillus
13	MOM aérienne très rapide	13	C du sol aérien très rapide
14	MOM souterraine très rapide	14	C du sol souterrain très rapide
15	MOM aérienne rapide	15	C du sol aérien rapide
16	MOM souterraine rapide	16	C du sol souterrain rapide
17	MOM moyenne	17	C du sol moyen
18	MOM aérienne lente	18	C du sol aérien lent
19	MOM souterraine lente	19	C du sol souterrain lent
20	Chicots de tiges de résineux	20	Chicots de tiges de résineux
21	Chicots de branches de résineux	21	Chicots de branches de résineux
22	Chicots de tiges de feuillus	22	Chicots de tiges de feuillus
23	Chicots de branches de feuillus	23	Chicots de branches de feuillus
24	Carbone noir	24	C noir
25	Tourbe	25	Tourbe
		26	CO ₂
		27	CH ₄
		28	CO
		29	N ₂ O
		30	produits

Annexe C : Densité moyenne de carbone (t C ha⁻¹) dans les réservoirs des parcs, définis par le GIEC (1990 à 2020)

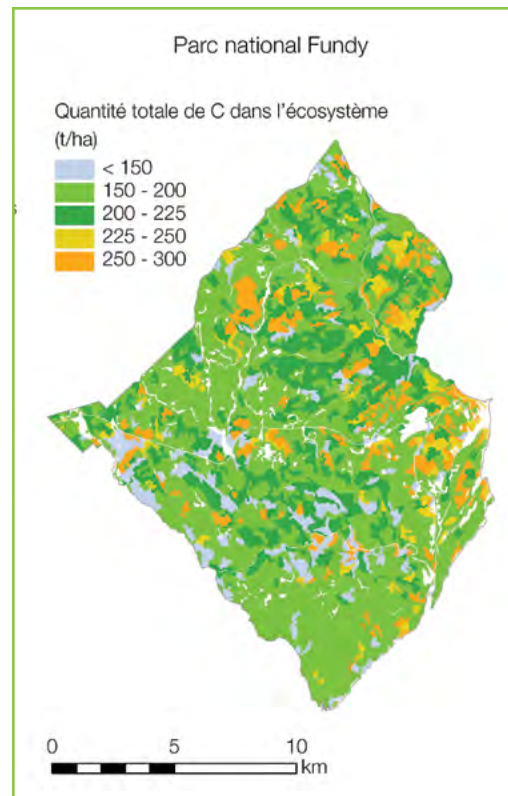
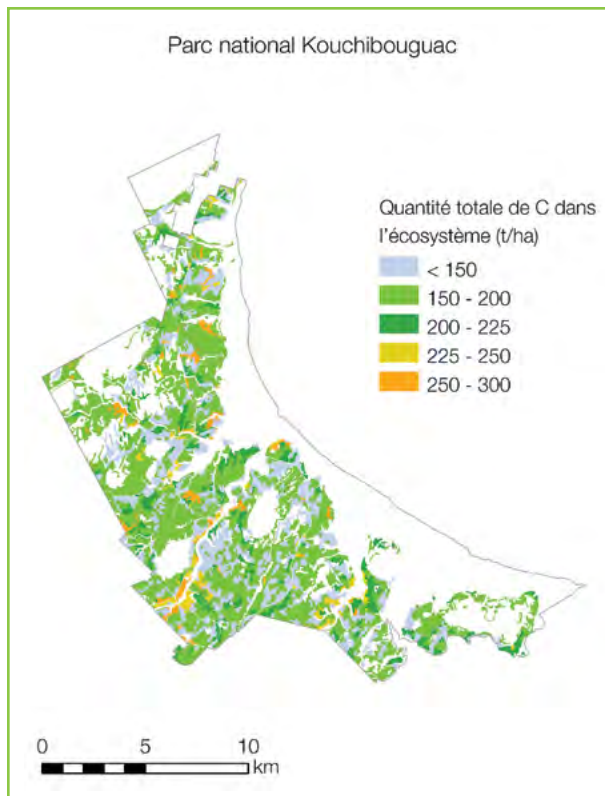
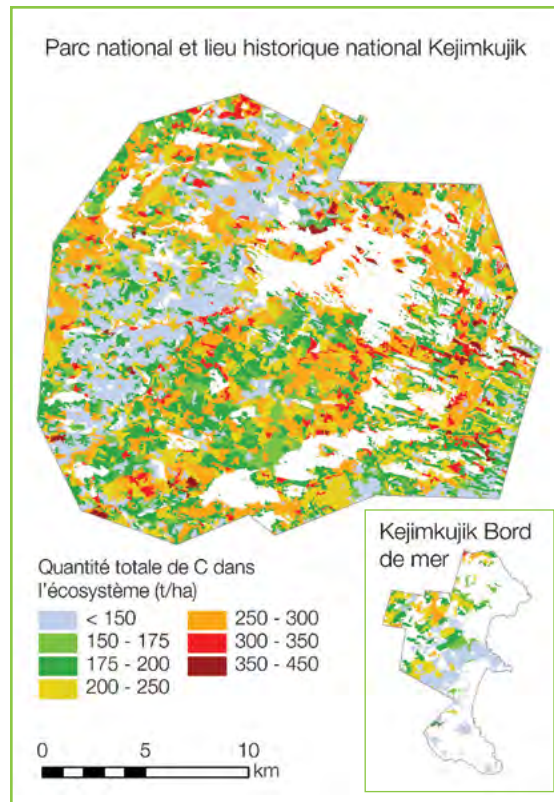
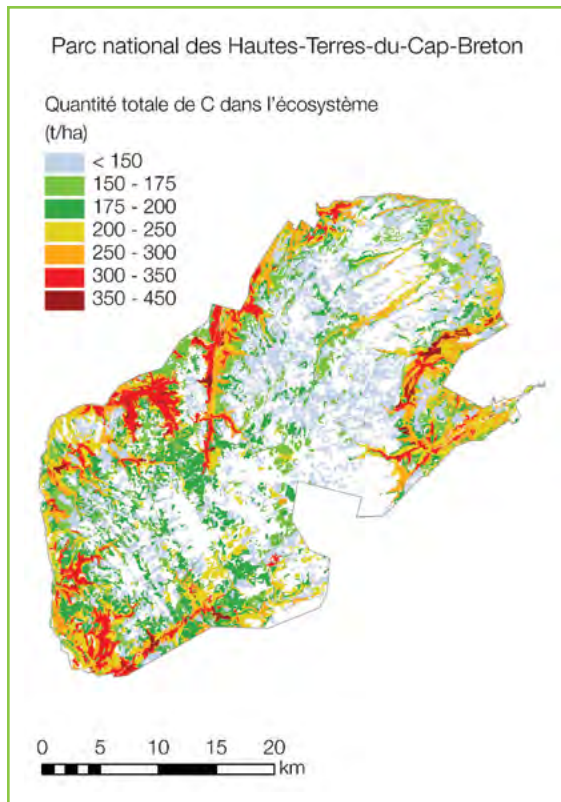
Nom du parc	Biomasse AE*	Biomasse ST*	Bois mort	Litière	C du sol	Total - écosystème
PN Banff	65	17	26	57	98	263
PN de la Péninsule-Bruce	35	10	15	26	64	150
PN des Hautes-Terres-du-Cap-Breton	43	10	15	39	78	185
PN Elk Island	61	16	31	62	117	287
PMN Fathom Five	43	12	11	31	65	161
PN Forillon	42	12	33	41	90	218
PN Fundy	40	10	11	40	83	185
PN des Îles-de-la-Baie-Georgienne	49	13	10	37	74	183
PN des Glaciers	125	28	38	69	89	349
PN du Gros-Morne	58	13	20	58	99	248
RPN des Îles-Gulf	132	29	35	59	152	408
RPN et site du patrimoine haida Gwaii Haanas	155	34	35	72	136	432
PN Jasper	66	17	26	58	101	268
PN, PNBM et LHN Kejimikujik	52	12	15	39	80	198
PN Kootenay	76	17	30	47	71	241
PN Kouchibouguac	37	10	13	34	76	170
PN de la Mauricie	80	20	28	63	118	309
RPN de l'Archipel-de-Mingan	52	13	18	41	82	206
PN du Mont-Revelstoke	107	24	23	55	76	285
RPN Pacific Rim	182	40	36	72	146	477
PN de la Pointe-Pelée	49	13	15	30	77	185
PN de Prince Albert	46	13	25	39	78	200
PN de l'Île-du-Prince-Édouard	47	11	22	39	84	203
PN Pukaskwa	49	13	20	48	88	218
PN du Mont-Riding	41	12	22	64	110	249
PUN de la Rouge	51	13	17	33	76	190
PN Terra-Nova	63	15	14	51	93	238
PN des Mille-Îles	44	12	19	32	77	184
PN des Lacs-Waterton	64	16	21	50	92	243
PN Wood Buffalo	52	14	41	53	97	257
PN Yoho	84	19	29	54	71	257
National	58	15	34	53	97	258

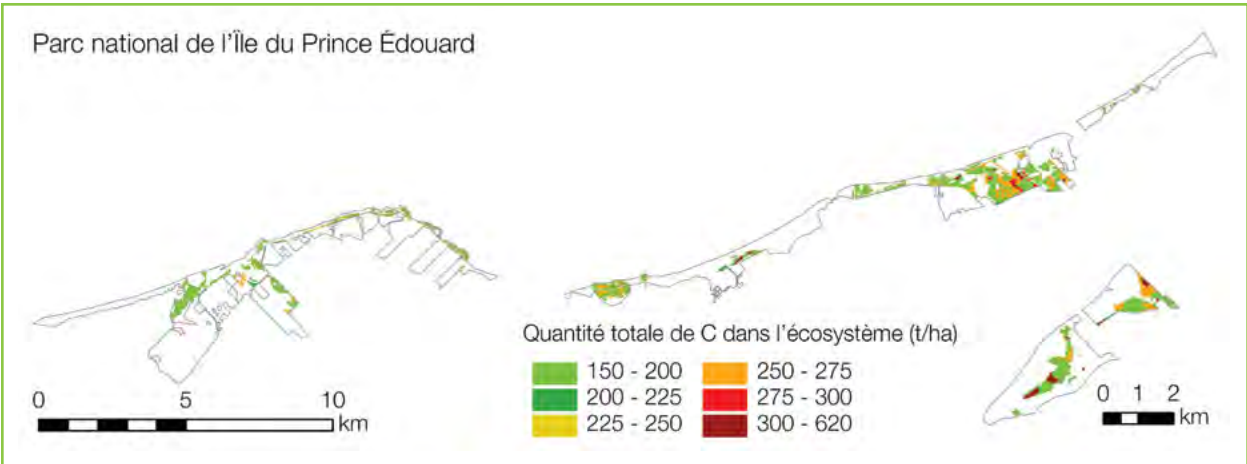
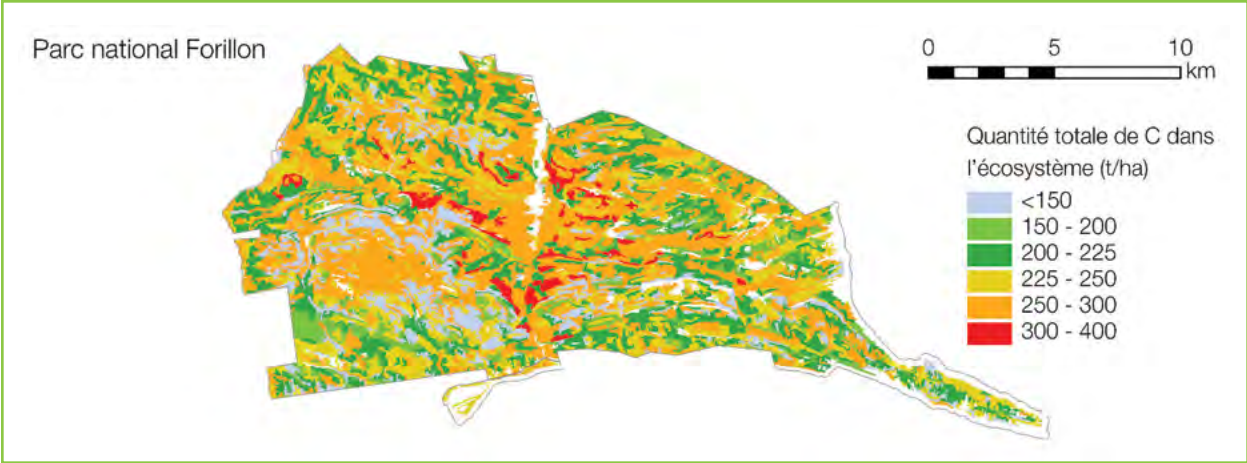
*AE – aérienne; ST – souterraine

Annexe D : Répartition spatiale de la densité totale de carbone de l'écosystème en 2020 (parcs regroupés par écozone)

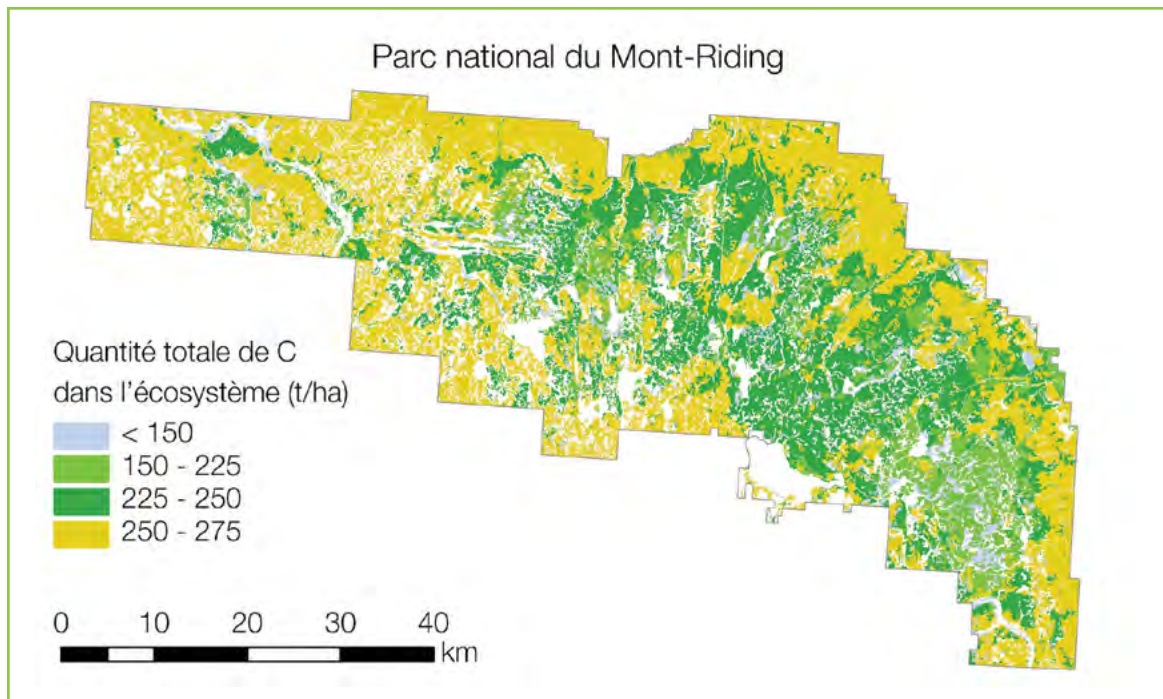
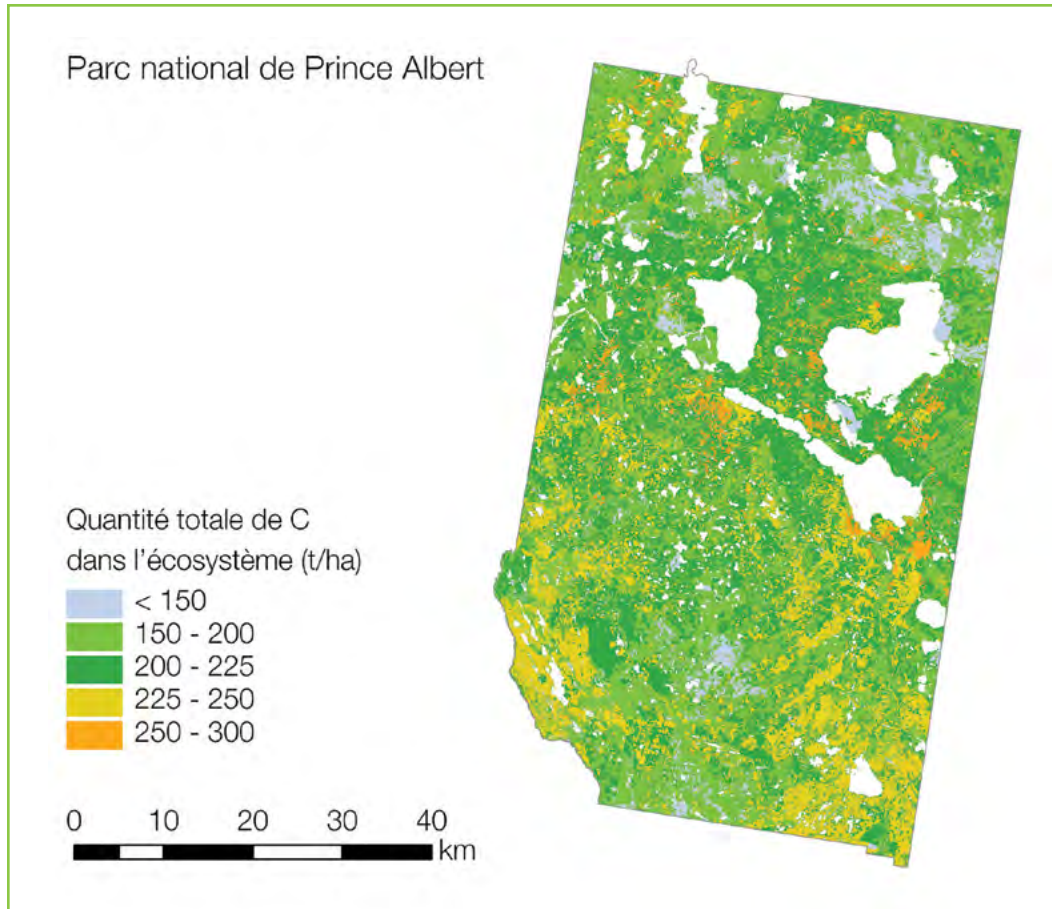
Annexe	Écozone
Di	Maritime de l'Atlantique
Dii	Plaines boréales (y compris le parc national Wood Buffalo)
Diii	Bouclier boréal
Div	Plaines à forêts mixtes
Dv	Cordillère montagnarde
Dvi	Maritime du Pacifique
Dvii	Prairies

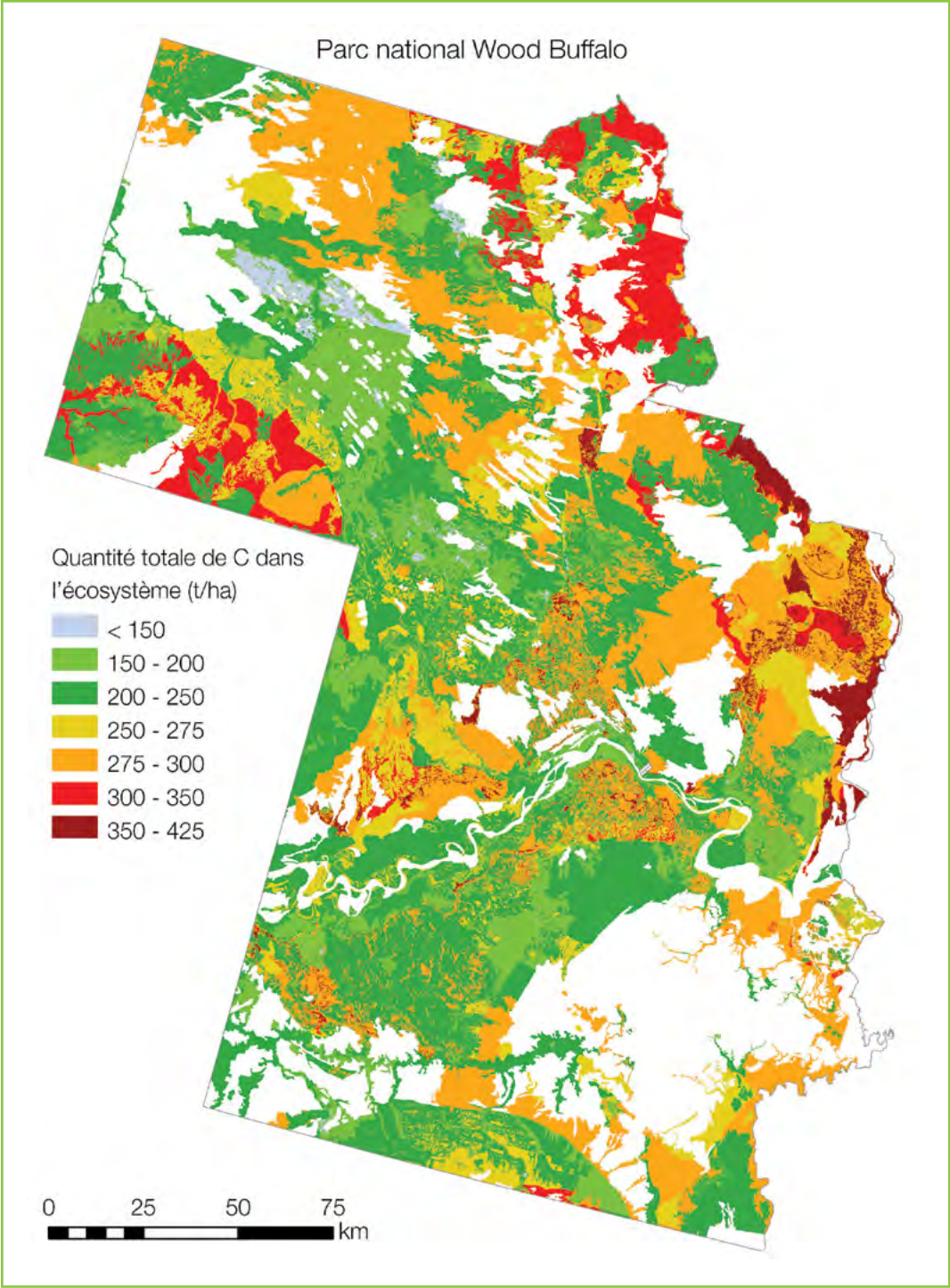
Annexe Di : Écozone maritime de l'Atlantique



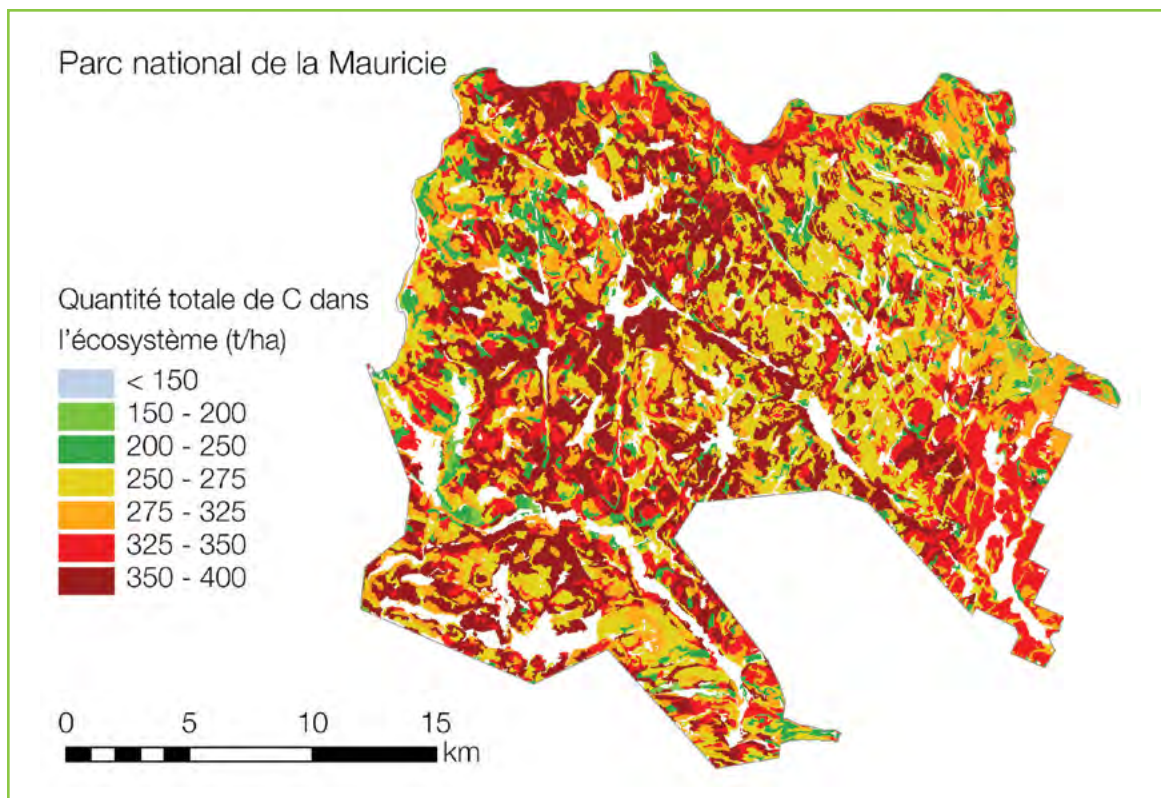
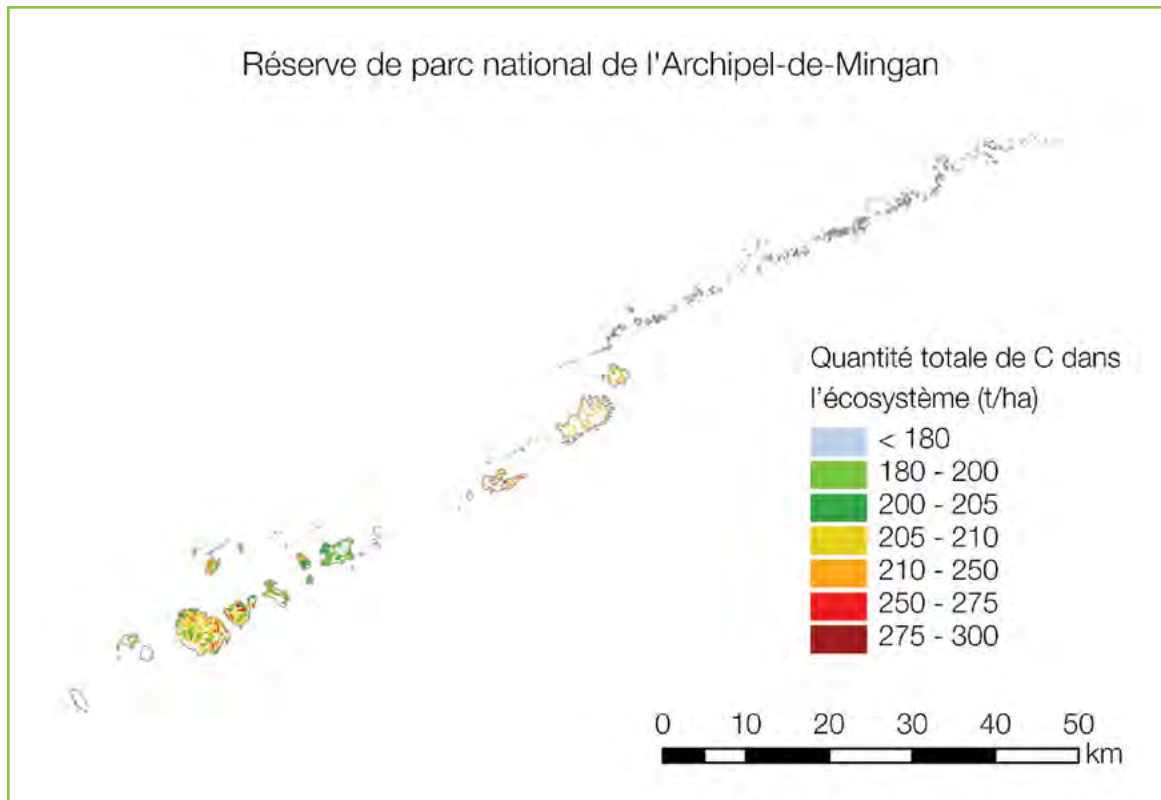


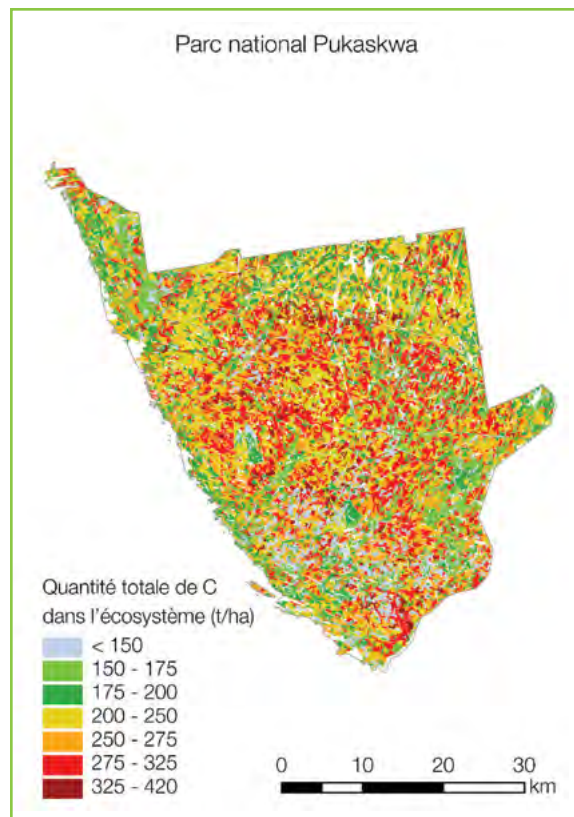
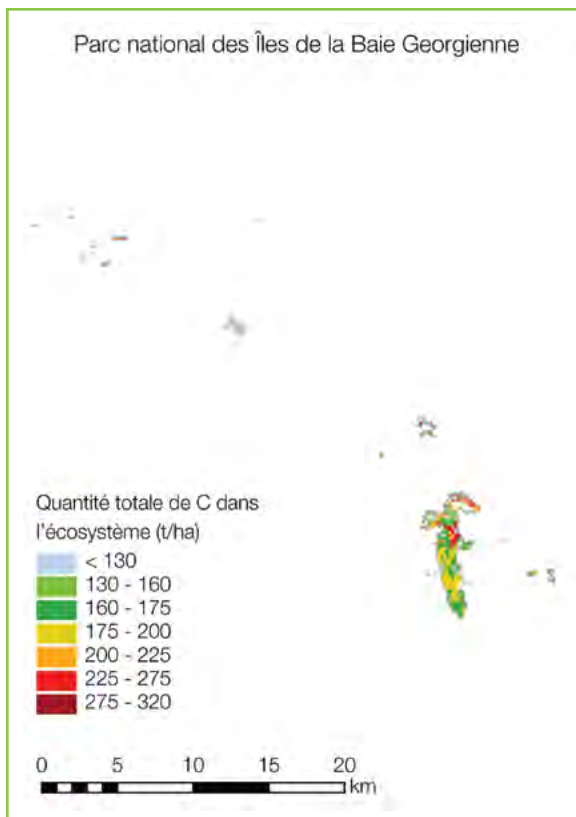
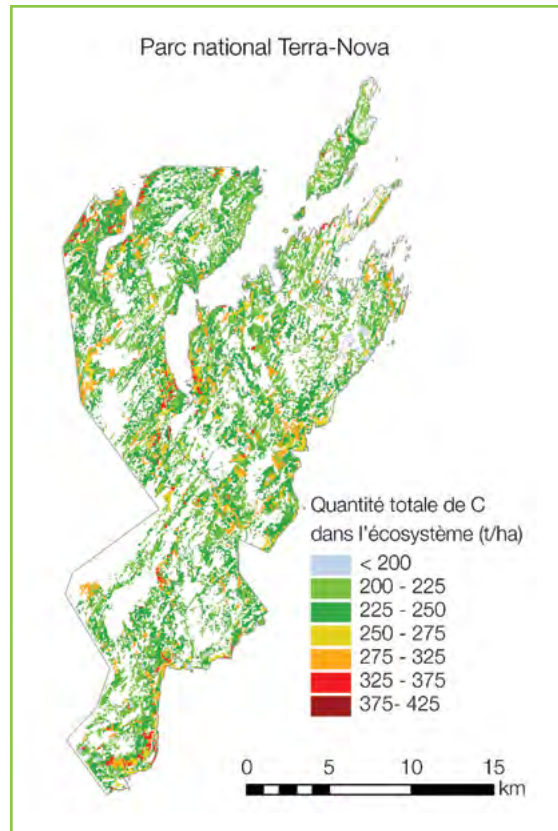
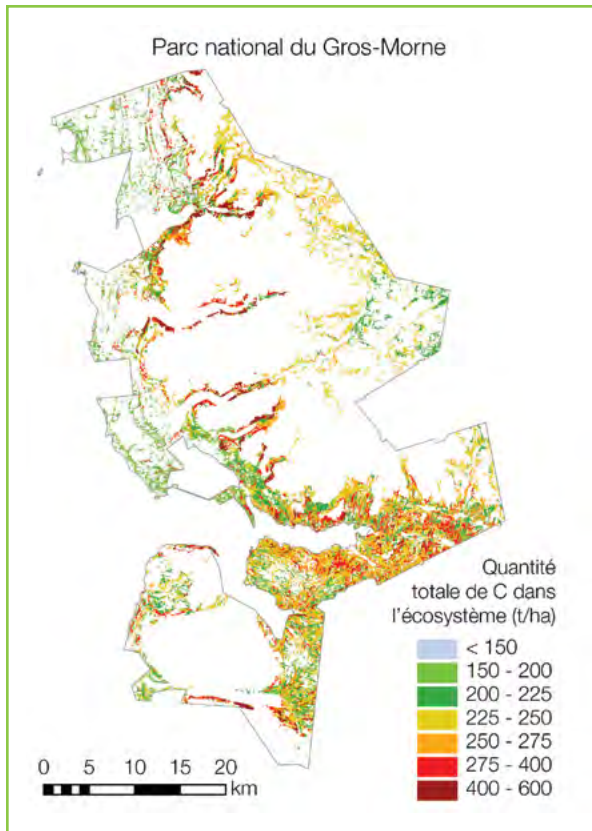
Annexe Dii : Écozone des plaines boréales



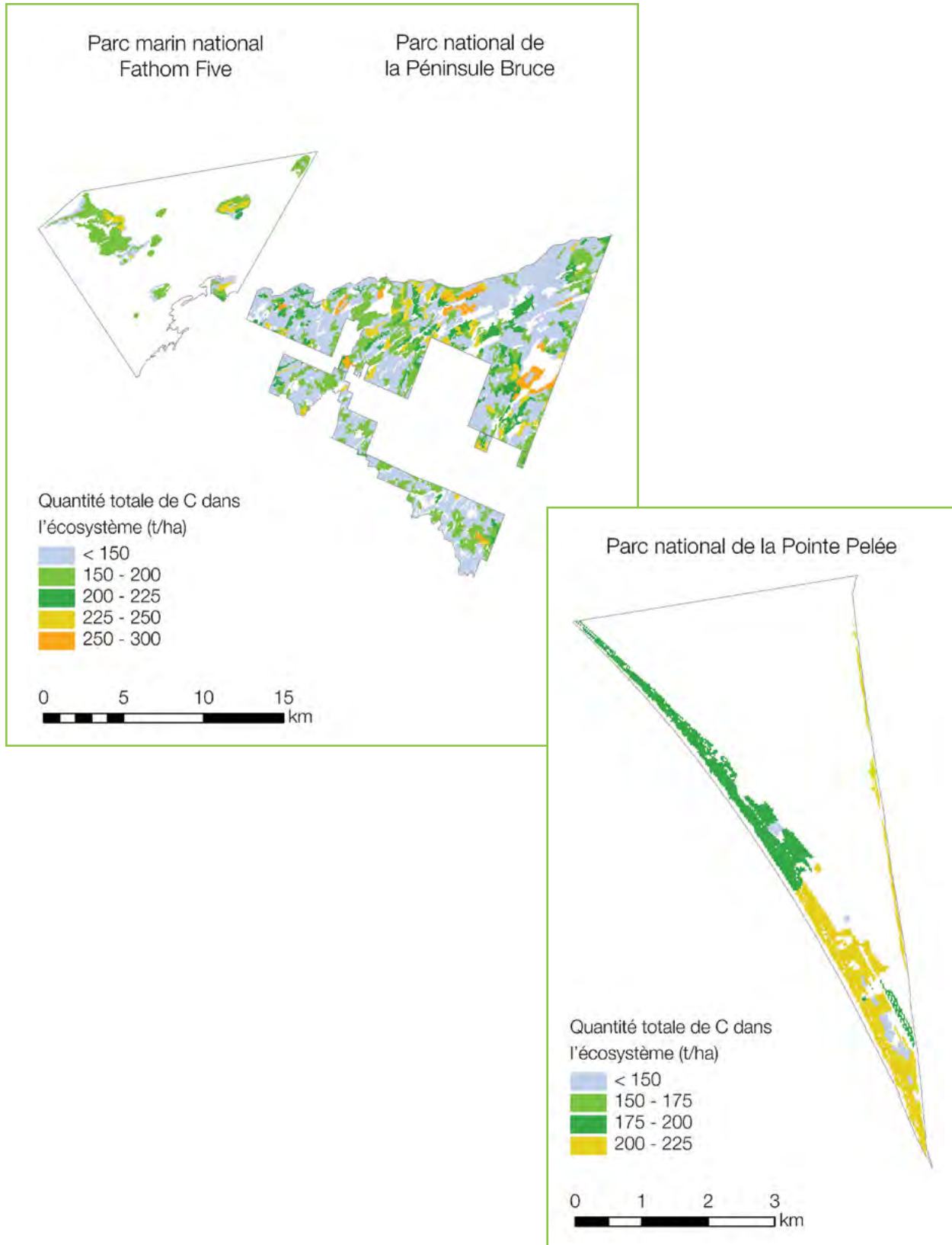


Annexe Diii : Écozone du bouclier boréal

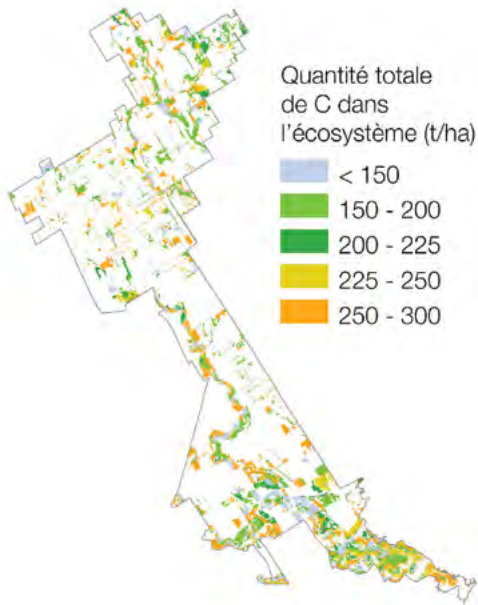




Annexe Div : Écozone des plaines à forêts mixtes

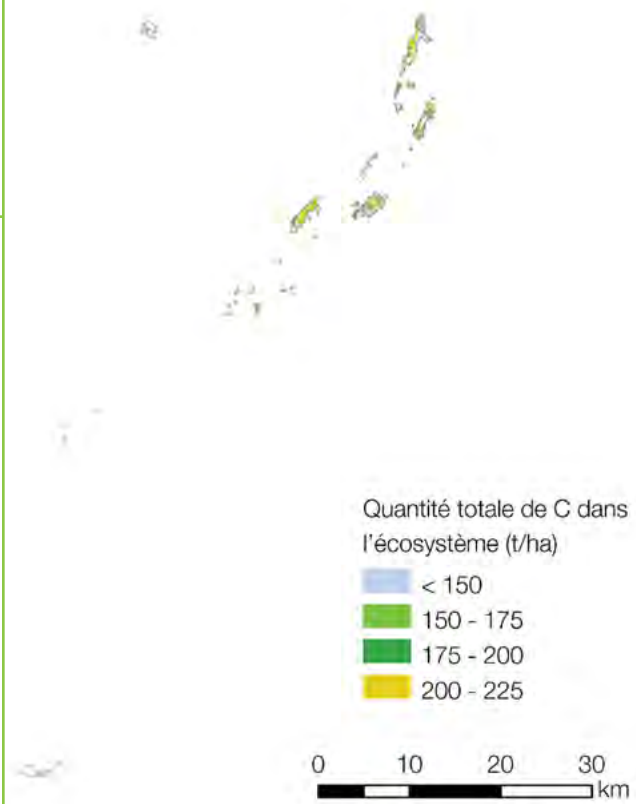


Parc urbain national de la Rouge



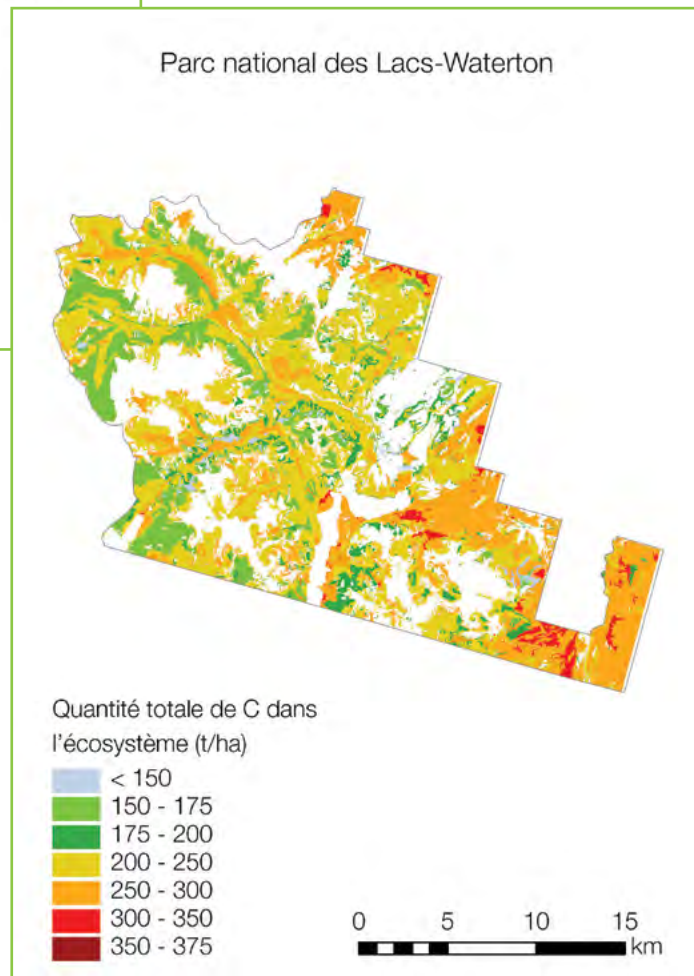
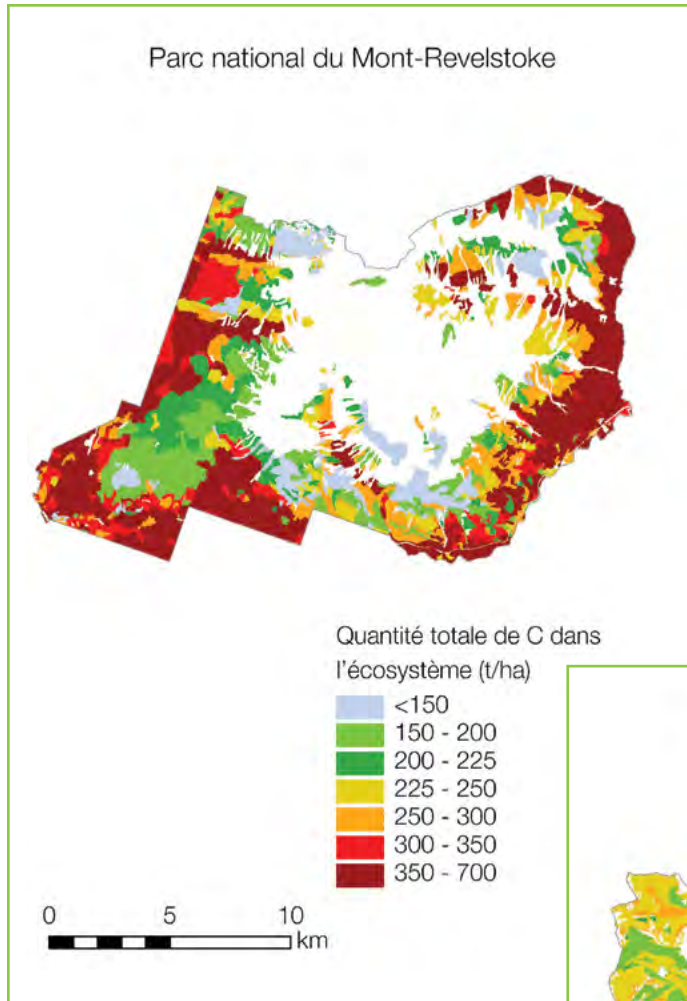
0 5 10 km

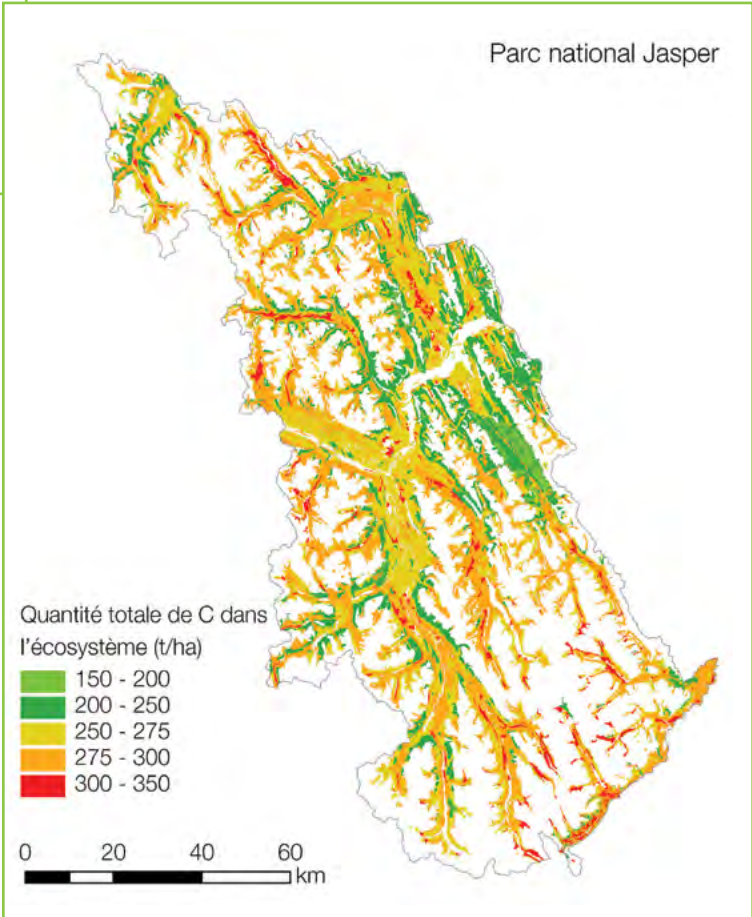
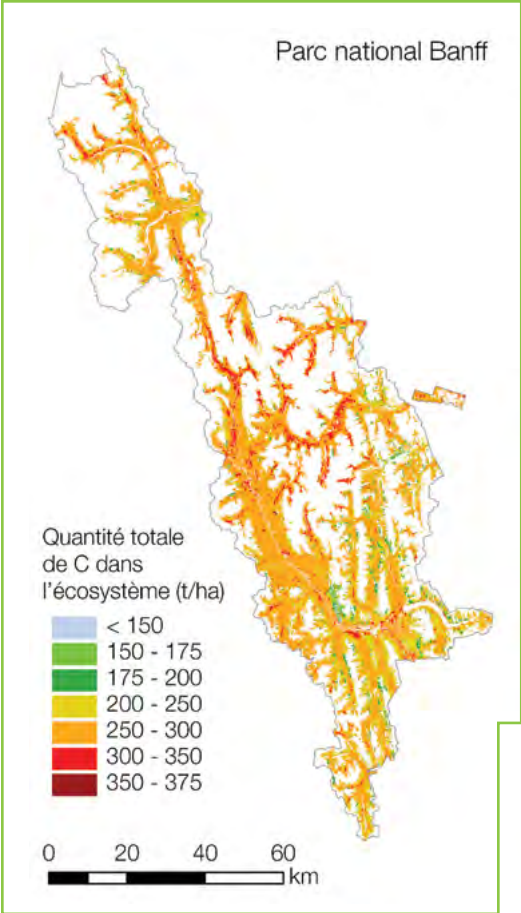
Parc national des Mille-Iles

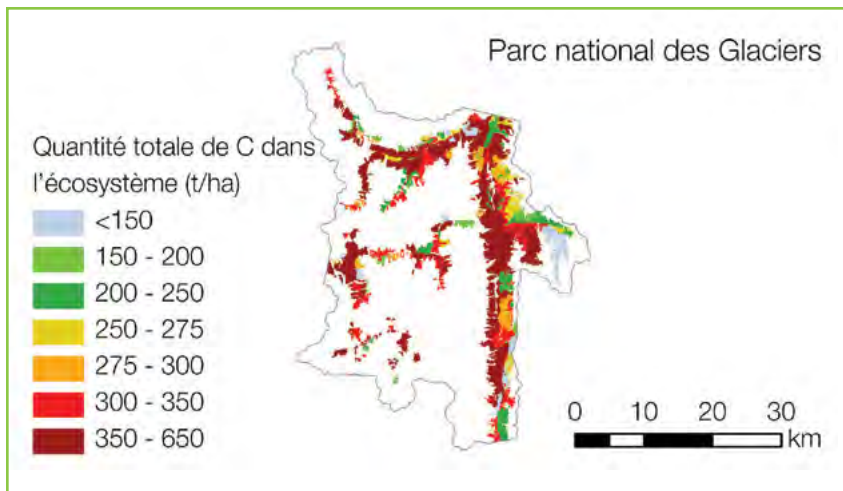
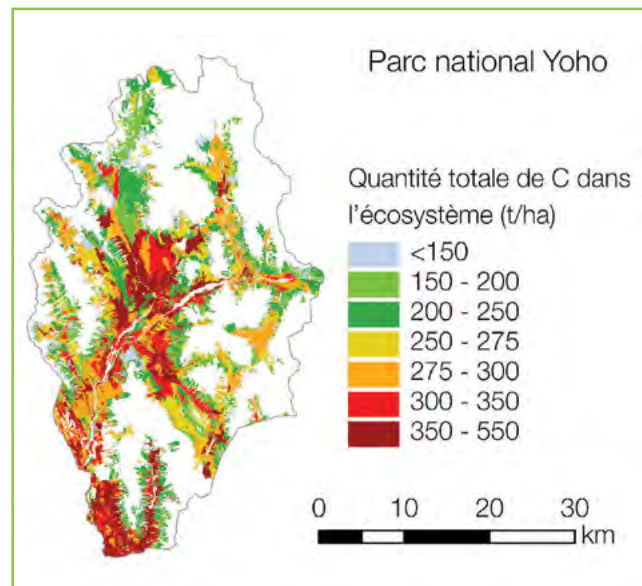
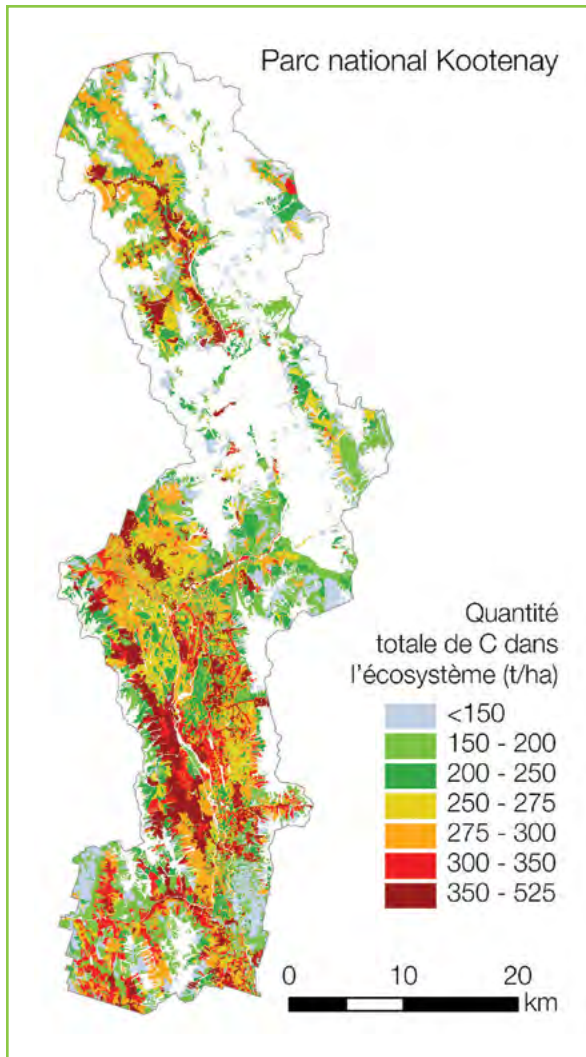


0 10 20 30 km

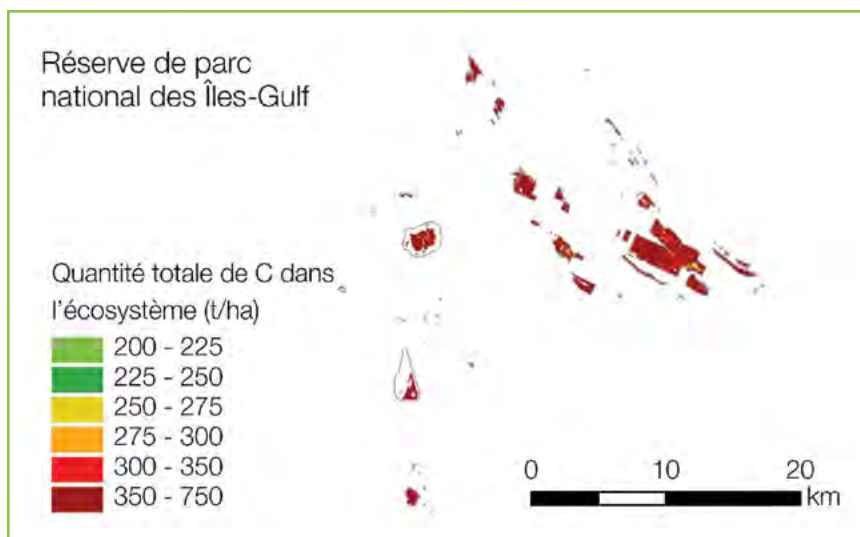
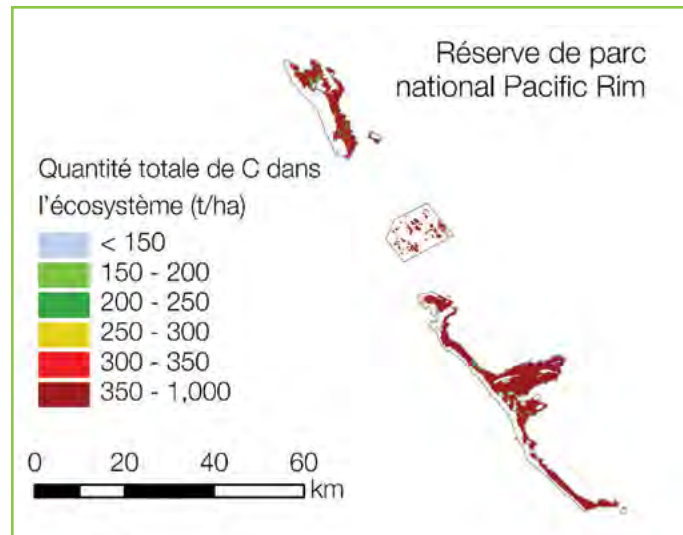
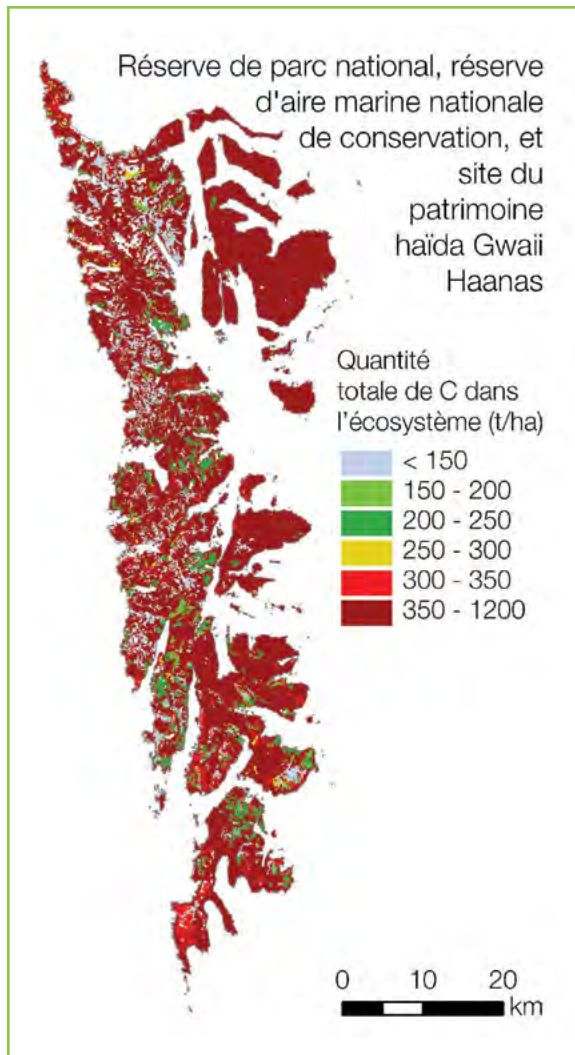
Annexe Dv : Écozone de la cordillère montagnarde



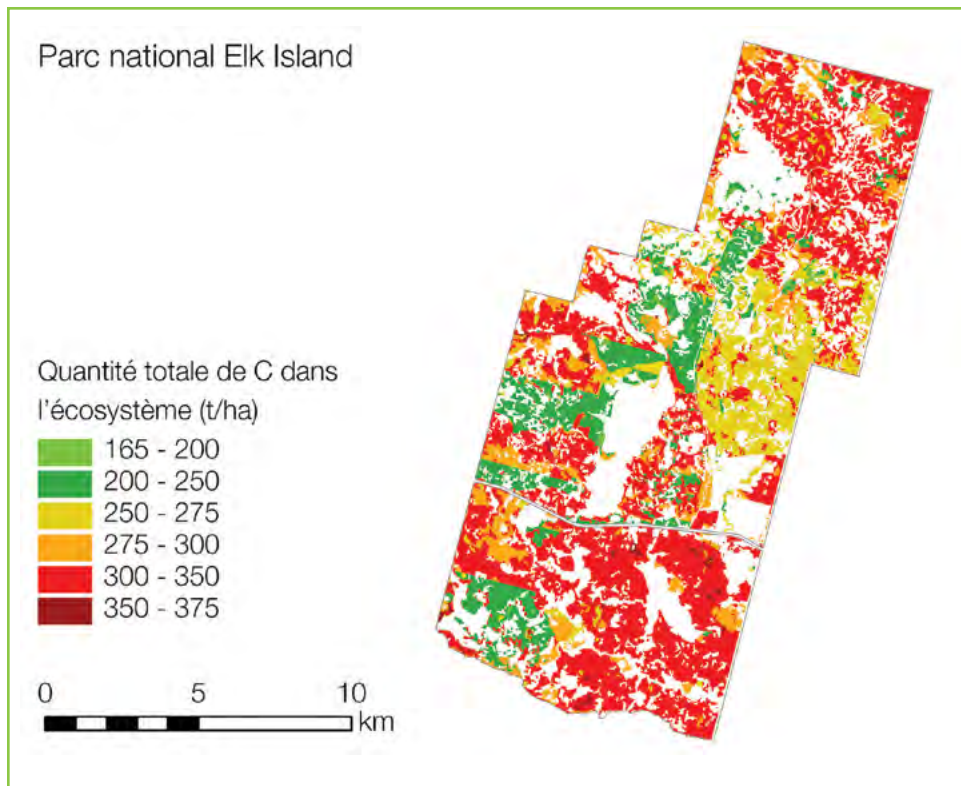




Annexe Dvi : Écozone maritime du Pacifique



Annexe Dvii : Écozone des prairies



Annexe E : Flux de carbone moyens par parc (1990 à 2020)

Nom du parc	Superficie (km ²)	PPN (t C an ⁻¹)	R _h (t C an ⁻¹)	PNE (t C an ⁻¹)	PPN (t C ha ⁻¹ an ⁻¹)	R _h (t C ha ⁻¹ an ⁻¹)	PNE (t C ha ⁻¹ an ⁻¹)
PN Banff	3216	1 118 182	1 043 562	74 620	3,48	3,25	0,23
PN de la Péninsule-Bruce	132	42 975	35 583	7 392	3,25	2,69	0,56
PN des Hautes-Terres-du-Cap-Breton	621	229 411	202 091	27 320	3,69	3,25	0,44
PN Elk Island	121	54 348	50 271	4 077	4,49	4,16	0,34
PMN Fathom Five	13	4 479	4 013	467	3,34	2,99	0,35
PN Forillon	234	93 807	77 144	16 663	4,01	3,30	0,71
PN Fundy	195	64 743	62 833	1 910	3,33	3,23	0,10
PN des Îles-de-la-Baie-Georgienne	10	3 777	3 376	400	3,83	3,43	0,41
PN des Glaciers	379	194 908	175 519	19 388	5,14	4,63	0,51
PN du Gros-Morne	442	214 420	189 907	24 513	4,85	4,30	0,55
RPN des Îles-Gulf	27	21 742	18 311	3 430	8,19	6,90	1,29
RPN et site du patrimoine haïda Gwaii Haanas	1 428	1 004 765	935 681	69 084	7,03	6,55	0,48
PN Jasper	5 692	1 966 185	1 921 005	45 180	3,45	3,38	0,08
PN, PNBM et LHN Kejimikujik	308	126 074	112 441	13 633	4,09	3,65	0,44
PN Kootenay	820	340 708	277 830	62 877	4,15	3,39	0,77
PN Kouchibouguac	123	36 999	34 734	2 265	3,02	2,83	0,18
PN de la Mauricie	473	244 334	219 309	25 025	5,16	4,63	0,53
RPN de l'Archipel-de-Mingan	42	13 368	12 026	1 342	3,15	2,83	0,32
PN du Mont-Revelstoke	169	88 219	70 656	17 562	5,22	4,18	1,04
RPN Pacific Rim	271	214 723	202 483	12 240	7,93	7,48	0,45
PN de la Pointe-Pelée	2	1 123	936	187	4,64	3,87	0,77
PN de Prince Albert	3 462	1 029 778	943 527	86 251	2,97	2,73	0,25
PN de l'Île-du-Prince-Édouard	7	2 796	2 547	249	3,92	3,57	0,35
PN Pukaskwa	1 683	659 825	573 381	86 443	3,92	3,41	0,51
PN du Mont-Riding	2 385	952 319	915 049	37 270	3,99	3,84	0,16
PUN de la Rouge	19	7 958	6 754	1 204	4,21	3,57	0,64
PN Terra-Nova	204	86 813	83 792	3 021	4,25	4,10	0,15
PN des Mille-Îles	14	5 677	4 706	971	4,14	3,43	0,71
PN des Lacs-Waterton	341	117 921	115 282	2 639	3,45	3,38	0,08
PN Wood Buffalo	32 871	12 523 697	10 822 380	1 701 316	3,81	3,29	0,52
PN Yoho	663	283 393	234 209	49 183	4,27	3,53	0,74

Annexe F : Superficie forestière totale (km²) touchée par les perturbations (de 1990 à 2020)

Nom du parc	Feux de forêt	Brûlage dirigé	Les insectes	Total
PN Banff	119,5	128,2	969,4	1 217,1
PN de la Péninsule-Bruce			1,5	1,5
PN Elk Island	16,3	37,2		53,5
PN Forillon		1,0	417,9	418,9
PN Fundy	0,3			0,3
PN des Îles-de-la-Baie-Georgienne			0,6	0,6
PN des Glaciers	58,7	0,5	423,9	5 266,5
PN du Gros-Morne			68,6	68,6
RPN des Îles-Gulf*				0,0
PN Jasper	42,3	207,3	5 293,7	5 543,3
PN, PNBM et LHN Kejimikujik	0,5	0,1		0,6
PN Kootenay	124,4	35,4	666,5	9 813,2
PN de la Mauricie	1,2	23,0	48,1	72,3
RPN de l'Archipel-de-Mingan	0,0		44,5	44,5
PN du Mont-Revelstoke	5,5	0,6	48,5	880,5
PN de la Pointe-Pelée			0,0	0,0
PN de Prince Albert	436,0	252,3	8 551,0	9 239,3
PN Pukaskwa	0,6	29,5	2 265,4	2 295,4
PN du Mont-Riding	2,3	113,2	298,2	413,6
PN Terra-Nova	0,1	2,1	4,4	6,6
PN des Mille-Îles		0,1	0,0	0,1
PN des Lacs-Waterton	167,5	25,8	71,8	265,1
PN Wood Buffalo	13 425,9	0,0	17 645,8	31 071,8
PN Yoho	0,2	9,9	842,6	10 503,6
Total général	14 401,4	866,2	37 662,4	52 929,0

*La zone de brûlage dirigé était très petite (1,28 ha)

Remarque : Les parcs qui n'ont pas été touchés par des perturbations ou pour lesquels des données sur les perturbations n'étaient pas disponibles pour cette étude ne sont pas inclus dans ce tableau.

Annexe G : Productivité annuelle nette du biome par parc (en t C ha⁻¹ an⁻¹)

Année	PN Banff	PN de la Péninsule-Bruce	PN des Hautes-Terres-du-Cap-Breton	PN Elk Island	PMN Fathom Five	PN Forillon	PN Fundy
1990	0,23	0,56	0,61	0,54	0,48	0,50	0,15
1991	0,27	0,58	0,61	-1,75	0,48	0,55	0,16
1992	0,27	0,59	0,61	0,47	0,48	0,59	0,15
1993	0,23	0,59	0,61	0,26	0,49	0,61	0,14
1994	0,18	0,60	0,56	-1,14	0,49	0,65	0,14
1995	0,27	0,57	0,56	0,42	0,39	0,69	0,11
1996	0,27	0,58	0,57	0,43	0,39	0,69	0,12
1997	0,27	0,59	0,57	0,43	0,39	0,51	0,12
1998	0,17	0,59	0,57	0,43	0,39	0,57	0,09
1999	0,09	0,60	0,52	0,43	0,39	0,56	0,10
2000	0,20	0,60	0,52	-1,77	0,39	0,61	0,09
2001	-0,01	0,60	0,52	0,36	0,39	0,65	0,09
2002	0,23	0,61	0,53	0,33	0,39	0,69	0,09
2003	-0,09	0,61	0,53	0,35	0,39	0,73	0,09
2004	0,23	0,61	0,40	-3,91	0,39	0,72	0,09
2005	0,08	0,55	0,40	0,09	0,31	0,75	0,09
2006	0,16	0,56	0,40	0,14	0,31	0,78	0,09
2007	0,20	0,56	0,41	0,18	0,31	0,80	0,09
2008	0,16	0,56	0,41	0,22	0,31	0,82	0,08
2009	0,07	0,56	0,37	0,25	0,31	0,78	0,09
2010	0,22	0,55	0,37	0,25	0,30	0,81	0,08
2011	0,19	0,56	0,37	0,27	0,30	0,83	0,08
2012	0,22	0,56	0,37	0,28	0,30	0,85	0,09
2013	0,21	0,56	0,37	0,31	0,30	0,86	0,08
2014	-0,32	0,56	0,29	0,33	0,30	0,83	0,08
2015	0,04	0,48	0,29	0,31	0,24	0,84	0,08
2016	0,18	0,48	0,29	0,33	0,24	0,81	0,08
2017	0,17	0,48	0,29	0,34	0,24	0,80	0,08
2018	0,19	0,48	0,29	0,35	0,24	0,87	0,07
2019	0,15	0,48	0,22	0,36	0,24	0,66	0,07
2020	0,12	0,47	0,21	0,34	0,23	0,60	0,06

Année	PN des Îles-de-la-Baie-Georgienne	PN des Glaciers	PN du Gros-Morne	RPN des Îles-Gulf	RPN et site du patrimoine haïda Gwaii Haanas	PN Jasper	PN et LHN Kejimikujik
1990	0,49	0,94	0,89	0,92	0,35	0,11	0,51
1991	0,47	0,84	0,90	0,93	0,37	0,10	0,51
1992	0,47	0,91	0,92	0,94	0,38	0,10	0,52
1993	0,47	0,91	0,93	0,96	0,40	0,10	0,52
1994	0,47	0,74	0,94	1,28	0,41	0,10	0,49
1995	0,46	0,75	0,67	1,28	0,43	0,11	0,50
1996	0,46	0,73	0,44	1,29	0,45	0,10	0,50
1997	0,46	0,74	0,48	1,30	0,44	0,10	0,50
1998	0,46	0,66	0,53	1,31	0,45	0,10	0,50
1999	0,46	0,75	0,55	1,24	0,46	0,10	0,48
2000	0,40	0,76	0,45	1,25	0,48	0,03	0,49
2001	0,33	0,73	0,46	1,26	0,49	0,10	0,49
2002	0,35	0,77	0,44	1,27	0,49	0,10	0,49
2003	0,36	0,08	0,43	1,27	0,50	-0,74	0,48
2004	0,37	0,69	0,46	1,40	0,51	0,08	0,47
2005	0,37	0,63	0,42	1,40	0,53	0,08	0,47
2006	0,37	0,58	0,44	1,40	0,54	-0,01	0,47
2007	0,38	0,61	0,46	1,40	0,50	0,07	0,47
2008	0,38	0,23	0,47	1,41	0,51	0,06	0,46
2009	0,39	0,58	0,48	1,37	0,51	-0,01	0,43
2010	0,39	0,61	0,49	1,38	0,52	0,07	0,43
2011	0,38	0,62	0,50	1,38	0,52	0,06	0,43
2012	0,38	0,44	0,52	1,39	0,53	0,07	0,42
2013	0,38	0,52	0,54	1,39	0,53	0,06	0,41
2014	0,38	0,55	0,56	1,37	0,54	0,06	0,39
2015	0,38	0,53	0,44	1,38	0,54	-0,03	0,39
2016	0,38	0,37	0,45	1,37	0,54	0,06	0,38
2017	0,38	-7,39	0,49	1,39	0,52	0,07	0,37
2018	0,38	-4,13	0,49	1,40	0,52	0,05	0,36
2019	0,38	-0,93	0,50	1,38	0,52	0,02	0,34
2020	0,38	-1,01	0,45	1,38	0,52	0,02	0,33

Année	PNBM Kejimikujik	PN Kootenay	PN Kouchi- bougac	PN de la Mauricie	RPN de l'Archipel- de-Mingan	PN du Mont- Revelstoke	RPN Pacific Rim	PN de la Pointe- Pelée
1990	0,26	1,20	0,30	0,73	0,44	1,14	0,33	0,81
1991	0,27	1,05	0,31	0,77	0,49	1,15	0,36	0,82
1992	0,27	1,17	0,31	0,78	0,40	1,15	0,38	0,84
1993	0,27	1,17	0,31	0,71	0,40	1,15	0,40	0,85
1994	0,25	1,14	0,29	0,73	0,40	1,15	0,42	0,86
1995	0,25	1,05	0,28	0,72	0,40	1,15	0,44	0,87
1996	0,25	0,97	0,27	0,75	0,40	1,13	0,45	0,88
1997	0,25	0,99	0,27	0,74	0,39	1,11	0,46	0,89
1998	0,25	0,97	0,25	0,63	0,39	1,11	0,47	0,90
1999	0,22	0,96	0,24	0,62	0,39	1,12	0,44	0,91
2000	0,22	0,95	0,23	0,63	0,39	1,12	0,45	0,75
2001	0,22	0,86	0,22	0,62	0,40	1,12	0,46	0,75
2002	0,22	0,90	0,21	0,63	0,32	1,12	0,46	0,76
2003	0,22	-0,49	0,21	0,41	0,32	0,29	0,47	0,77
2004	0,17	0,76	0,20	0,53	0,32	1,07	0,48	0,77
2005	0,17	0,73	0,19	0,54	0,32	1,07	0,49	0,76
2006	0,17	0,72	0,18	0,55	0,32	1,06	0,49	0,77
2007	0,17	0,58	0,17	0,54	0,33	1,03	0,50	0,78
2008	0,17	-0,72	0,17	0,43	0,33	1,03	0,50	0,78
2009	0,14	0,64	0,16	0,46	0,33	1,03	0,46	0,62
2010	0,14	0,64	0,14	0,46	0,32	1,03	0,46	0,63
2011	0,14	0,63	0,13	0,47	0,32	1,03	0,46	0,65
2012	0,14	0,45	0,12	0,46	0,29	1,04	0,47	0,67
2013	0,14	0,17	0,11	0,35	0,27	1,03	0,47	0,69
2014	0,07	0,64	0,10	0,21	0,29	1,00	0,47	0,71
2015	0,07	0,64	0,08	0,01	0,29	0,98	0,48	0,71
2016	-1,52	0,61	0,07	0,08	0,22	0,93	0,47	0,72
2017	-0,11	-3,35	0,06	0,27	0,21	0,89	0,47	0,74
2018	-0,08	-1,98	0,06	0,20	0,22	-0,44	0,48	0,76
2019	-0,08	0,12	0,05	0,19	0,23	0,71	0,44	0,78
2020	-0,07	0,13	0,04	0,18	-0,38	0,64	0,44	0,80

Année	PN de Prince Albert	PN de l'Île-du-Prince-Édouard	PN Pukaskwa	PN du Mont-Riding	PUN de la Rouge	PN Terra-Nova	PN des Mille-Îles
1990	0,44	0,67	0,75	0,32	0,73	0,24	0,56
1991	0,46	0,67	0,75	0,25	0,75	0,24	0,58
1992	0,44	0,67	0,75	0,25	0,74	0,24	0,61
1993	0,44	0,28	0,75	0,26	0,72	0,24	0,63
1994	0,43	0,30	0,76	0,26	0,70	0,24	0,65
1995	0,37	0,49	0,76	0,27	0,70	0,22	0,67
1996	0,17	0,45	0,39	0,23	0,71	0,22	0,68
1997	0,32	0,41	0,37	0,23	0,71	0,24	0,71
1998	-0,31	0,38	0,30	0,24	0,72	0,23	0,69
1999	0,06	0,34	0,31	0,24	0,72	0,24	0,70
2000	0,05	0,59	0,32	0,20	0,71	0,14	0,71
2001	0,06	0,62	0,35	0,18	0,71	0,13	0,72
2002	-0,16	0,65	0,27	0,10	0,70	0,12	0,72
2003	-0,02	0,68	0,40	0,15	0,67	0,13	0,73
2004	0,00	0,71	0,42	0,18	0,62	0,13	0,74
2005	0,04	0,19	0,45	0,14	0,63	0,16	0,74
2006	0,01	0,20	0,36	0,13	0,62	0,16	0,74
2007	0,12	0,21	0,48	0,15	0,62	0,15	0,75
2008	-0,03	0,23	0,42	-0,03	0,63	0,14	0,75
2009	-0,28	0,24	0,44	0,16	0,62	0,14	0,75
2010	0,21	0,07	0,47	0,11	0,61	0,12	0,73
2011	0,18	0,07	0,47	0,05	0,61	0,11	0,75
2012	0,25	0,08	0,49	0,10	0,60	0,11	0,75
2013	0,31	0,09	0,53	0,11	0,56	0,10	0,75
2014	0,31	0,09	0,52	0,10	0,53	0,10	0,74
2015	-0,32	0,23	0,57	-0,05	0,53	0,03	0,73
2016	0,33	0,24	0,56	0,04	0,52	-0,07	0,73
2017	0,37	0,24	0,58	-0,04	0,52	0,01	0,73
2018	-1,51	0,25	0,54	-0,13	0,52	0,05	0,73
2019	0,33	0,26	0,55	-0,13	0,51	0,05	0,73
2020	0,38	0,22	0,57	-0,12	0,50	0,03	0,69

Année	PN des Lacs- Waterton	PN Wood Buffalo	PN Yoho
1990	0,20	0,64	0,91
1991	0,21	0,65	0,91
1992	0,21	0,66	0,92
1993	0,21	0,67	0,93
1994	0,15	0,67	0,93
1995	0,19	0,66	0,94
1996	0,19	0,57	0,89
1997	0,19	0,65	0,90
1998	-0,76	0,53	0,90
1999	0,14	0,13	0,90
2000	0,15	0,59	0,92
2001	0,15	0,60	0,90
2002	0,13	0,66	0,91
2003	0,10	-0,80	0,88
2004	0,15	-1,42	0,85
2005	0,14	0,17	0,65
2006	0,05	0,44	0,77
2007	0,14	-1,50	0,77
2008	-0,28	0,46	0,72
2009	0,12	0,48	0,64
2010	0,12	0,50	0,59
2011	0,11	-0,16	0,32
2012	0,11	-1,52	0,59
2013	0,11	0,07	0,61
2014	0,01	-1,97	0,62
2015	-0,14	-4,74	0,63
2016	-0,17	0,14	0,58
2017	-18,14	-0,42	0,54
2018	-0,75	-0,01	0,38
2019	-0,46	-0,61	0,31
2020	-0,38	0,34	0,27

