



La forêt boréale du Québec : influence du gradient longitudinal

Pierre-Luc Couillard, Serge Payette, Martin Lavoie and Jason Laflamme

Volume 143, Number 2, Summer 2019

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1060052ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1060052ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

La Société Provancher d'histoire naturelle du Canada

ISSN

0028-0798 (print)

1929-3208 (digital)

[Explore this journal](#)

Article abstract

The black spruce-moss forest is the largest bioclimatic domain in Québec (Canada), extending east from the Abitibi region to the Basse-Côte-Nord region. We documented changes in climate, ecological disturbance, surface deposit, topography and vegetation cover along a 1 000-km longitudinal transect through this domain. In the western portion, where the drier continental climate favours wildfire, black spruce and mixed black spruce-jack pine forests predominate. In the central portion, black spruce-balsam fir forests increase in importance. Further east, the more humid climate of the Côte-Nord region, where wildfires are less frequent, favours pure balsam fir and balsam fir-black spruce forests, which have been heavily affected by insect outbreaks. The proportion of mature stands (>100 years) is highest in this region. Lichen woodlands and lichen-heaths are more abundant east of Sept-Îles. The extent of the changes observed shows that the longitudinal gradient is just as important as the latitudinal gradient in explaining the distribution of plant communities in the boreal forest, although the latter has been studied more often.

Cite this article

Couillard, P.-L., Payette, S., Lavoie, M. & Laflamme, J. (2019). La forêt boréale du Québec : influence du gradient longitudinal. *Le Naturaliste canadien*, 143(2), 18–32. <https://doi.org/10.7202/1060052ar>

La forêt boréale du Québec : influence du gradient longitudinal

Pierre-Luc Couillard, Serge Payette, Martin Lavoie et Jason Laflamme

Résumé

Nous avons documenté les caractéristiques physiographiques, climatiques et écologiques du domaine bioclimatique de la pessière noire à mousses le long d'un transect longitudinal de 1 000 km, de l'Abitibi à la Basse-Côte-Nord. Dans la portion ouest du domaine, le climat continental et plus sec favorise les feux. Les pessières à épinette noire et celles à épinette noire et à pin gris constituent les peuplements dominants. Les pessières à épinette noire et sapin baumier augmentent en importance dans la portion centrale du domaine, tandis que sur la Côte-Nord, les feux moins fréquents et le climat plus humide favorisent les sapinières perturbées par les épidémies d'insectes. C'est dans cette région que la proportion de forêts âgées de plus de 100 ans est la plus élevée. Les pessières à lichens et les lichénaires sont aussi plus abondantes à l'est de Sept-Îles. L'ampleur des changements observés montre qu'il est primordial de considérer le gradient longitudinal pour expliquer la répartition des formations végétales de la forêt boréale, au même titre que le gradient latitudinal qui, lui, est beaucoup plus souvent étudié.

MOTS CLÉS : épinette noire, feu, gradient écologique, pin gris, sapin baumier

Abstract

The black spruce-moss forest is the largest bioclimatic domain in Québec (Canada), extending east from the Abitibi region to the Basse-Côte-Nord region. We documented changes in climate, ecological disturbance, surface deposit, topography and vegetation cover along a 1 000-km longitudinal transect through this domain. In the western portion, where the drier continental climate favours wildfire, black spruce and mixed black spruce-jack pine forests predominate. In the central portion, black spruce-balsam fir forests increase in importance. Further east, the more humid climate of the Côte-Nord region, where wildfires are less frequent, favours pure balsam fir and balsam fir-black spruce forests, which have been heavily affected by insect outbreaks. The proportion of mature stands (>100 years) is highest in this region. Lichen woodlands and lichen-heaths are more abundant east of Sept-Îles. The extent of the changes observed shows that the longitudinal gradient is just as important as the latitudinal gradient in explaining the distribution of plant communities in the boreal forest, although the latter has been studied more often.

KEYWORDS: balsam fir, black spruce, ecological gradient, fire, jack pine

Introduction

Le biome de la forêt boréale d'Amérique du Nord se divise en trois zones distinctes réparties selon la latitude allant, du sud au nord, de la forêt fermée à la forêt ouverte et à la toundra forestière (Payette, 1992). La zone de la forêt boréale fermée est subdivisée, à son tour, en deux domaines bioclimatiques, la sapinière à bouleau à papier et la pessière noire à mousses (Saucier et collab., 2011). Le domaine bioclimatique de la pessière noire à mousses couvre une superficie de 412 400 km², soit 27 % du Québec. Il forme une bande d'environ 300 km de largeur entre les latitudes 49° et 52° N. et s'étend sur un peu plus de 1 600 km depuis l'Abitibi à l'ouest jusqu'à la Basse-Côte-Nord à l'est, ce qui correspond à un gradient climatique longitudinal d'importance. Le climat de la partie ouest du domaine est continental et plus sec que celui de la partie est qui est sous influence maritime en raison de la proximité du golfe du Saint-Laurent et de l'océan Atlantique (Proulx et collab., 1987). Le changement des conditions climatiques qui survient le long du gradient longitudinal se manifeste par des différences marquées du régime de perturbations. La partie ouest est caractérisée par

le retour fréquent des feux (Le Goff et collab., 2007), tandis que ceux-ci sont beaucoup moins fréquents dans la partie est (Bouchard et collab., 2008). Les épidémies d'insectes et les chablis sont les principales perturbations qui affectent les peuplements forestiers de la Côte-Nord (Bouchard et Pothier, 2010; Girard et collab., 2014). Le relief devient aussi de plus en

Pierre-Luc Couillard (ingénieur forestier, M. Sc.) est étudiant au doctorat au Département de géographie de l'Université Laval et professionnel au ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec

pierre-luc.couillard@mffp.gouv.qc.ca

Serge Payette (B. Sc. appl. agronomie-pédologie et géographe, Ph. D.) est professeur titulaire au Département de biologie, conservateur de l'Herbier Louis-Marie et chercheur en écologie et paléoécologie au Centre d'études nordiques de l'Université Laval.

Martin Lavoie (géologue, Ph. D.) est professeur titulaire au Département de géographie et chercheur en paléoécologie au Centre d'études nordiques de l'Université Laval.

Jason Laflamme (ingénieur forestier, M. Sc.) est professionnel au ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

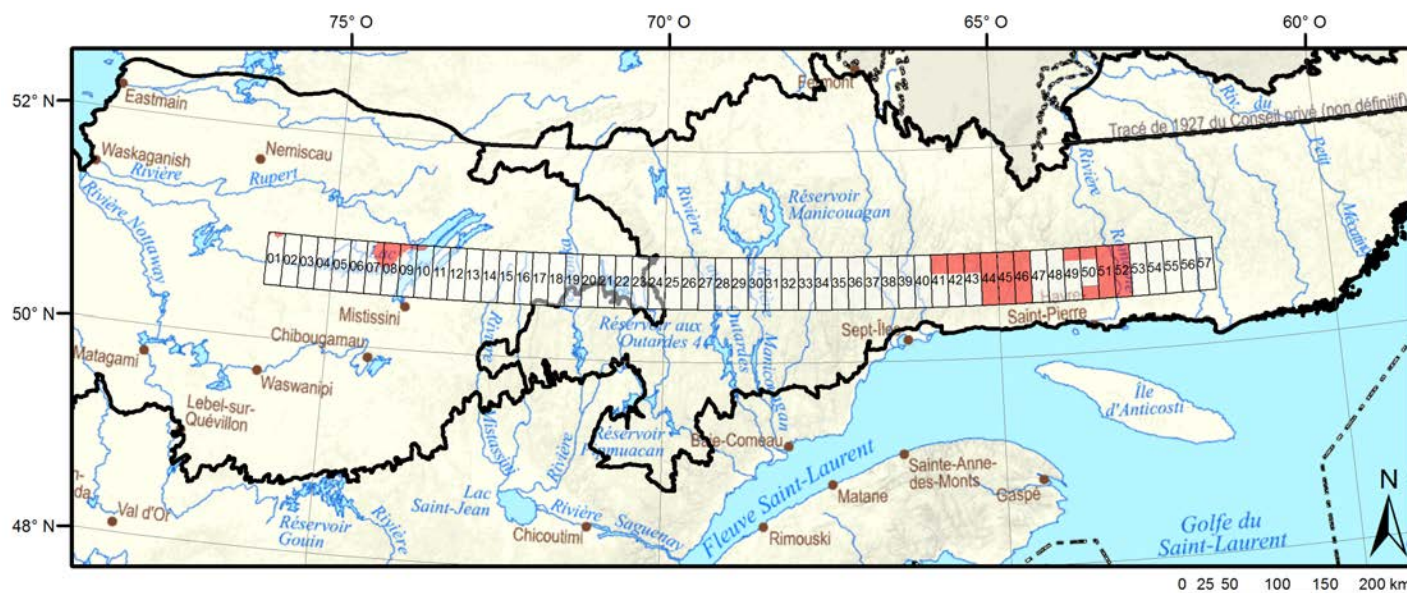


Figure 1. Emplacement du transect et des 57 blocs à l'étude. Les zones en rouge n'ont pas été cartographiées. La répartition du domaine bioclimatique de la pessière noire à mousses est délimitée par les lignes noires continues.

plus accidenté vers l'est. Ces changements longitudinaux des conditions du climat, du régime des perturbations naturelles et du relief sont probablement à l'origine des différences marquées du couvert forestier, tant en ce qui concerne la composition forestière que l'âge des peuplements.

Le premier objectif de cette étude est de quantifier l'ampleur de ces changements qui surviennent le long d'un transect longitudinal de 1 000 km dans la partie médiane du domaine de la pessière noire à mousses, entre les longitudes 76° et 61° O. et les latitudes 50° 30' et 51° N. (figure 1) à partir de différentes sources de données cartographiques. L'extrémité de la portion ouest du domaine, qui correspond à la plaine argileuse de l'Abitibi, a été exclue en raison de la nature des dépôts de surface (essentiellement des argiles et des limons) et du relief relativement plat. De plus, l'absence de données à l'est du village de Natashquan, dans la région de la Basse-Côte-Nord, ne permet pas d'inclure dans la présente analyse l'extrémité est du domaine. Le second objectif de cette étude est de mettre en relation les différents facteurs écologiques (climat, topographie, dépôts de surface, perturbations écologiques) qui expliquent les changements du couvert forestier, en ayant recours à une analyse numérique.

Méthodologie

Le transect longitudinal a été découpé systématiquement en 57 blocs, chacun étant formé de 4 cartes écoforestières superposées (échelle de 1/20 000; MRNF, 2009) couvrant ensemble une superficie de 970 km² (figure 1). Comme la zone cartographiée ne couvre que le territoire forestier sous aménagement, l'information cartographique est incomplète dans la portion nord de quelques blocs, tandis qu'aucune donnée n'est disponible pour les blocs 44, 45, 46, 51 et 52 dans la portion est du transect (figure 1).

Le territoire couvert par le transect ne renferme aucune ville ou aucun village. Les activités industrielles sont principalement l'exploitation forestière et minière et les projets de développement hydro-électrique. L'exploitation forestière est celle qui a affecté les plus grandes superficies. Elle a commencé de manière sporadique au cours de la décennie 1930 dans la région de Port-Cartier, puis s'est intensifiée à partir des années 1990.

Climat

Les données climatiques de l'Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise (Logan et collab., 2011) ont été utilisées. Il s'agit de normales climatiques calculées à partir des données quotidiennes de température et de précipitations recueillies au cours de la période 1971-2000. Ces données proviennent du Service national d'information sur les terres et les eaux (SNITE, une entité d'Agriculture et Agroalimentaire Canada) et sont fournies sur une grille géographique dont la résolution spatiale est de 10 km × 10 km. Les valeurs saisonnières de chacune des variables utilisées sont calculées pour chaque année. Une cartographie de la valeur moyenne de 30 ans est ensuite produite. Parmi l'ensemble des variables calculées, celles retenues pour les analyses sont la température moyenne annuelle, les températures moyennes maximales et minimales en été (mois de juin, juillet et août) et en hiver (mois de décembre, janvier et février), les précipitations totales ainsi que les précipitations estivales et hivernales. Une valeur moyenne de chacune de ces variables a été calculée pour chaque bloc.

Caractéristiques du milieu physique

Le type de dépôt de surface a été utilisé comme principale variable pour décrire le milieu physique. La nature du dépôt de surface est évaluée selon la texture du sol, la

Tableau 1. Description des principaux types de dépôts de surface (Robitaille et collab., 1994).

Types de dépôt	Description
Glaciaire épais (GLE)	Dépôt lâche ou compact, sans triage, constitué d'une farine de roches et de gravier, de cailloux, de pierres et de blocs de forme anguleuse ou subanguleuse, dont l'épaisseur est de plus de 50 cm. Affleurements rocheux absents ou très rares.
Glaciaire mince (GLM)	Dépôt lâche ou compact, sans triage, constitué d'une farine de roches et de gravier, de cailloux, de pierres et de blocs de forme anguleuse ou subanguleuse, dont l'épaisseur est de moins de 50 cm. Affleurements rocheux parfois abondants.
Fluvioglacière (FLU)	Dépôt stratifié constitué de sable, de gravier et (ou) de cailloux.
Organique (ORG)	Dépôt constitué de matière organique plus ou moins décomposée, provenant principalement de sphaignes, dont l'épaisseur est de plus de 40 cm.
Roc	Dépôt très mince ou absent. Les affleurements rocheux, qui sont très abondants, représentent plus de 50 % de la surface.
Autres	Dépôt d'origine fluviatile, lacustre, marine, gravitaire ou éolien.

Tableau 2. Description des groupes de végétation correspondant aux principaux types de forêts du domaine de la pessière noire à mousses.

Groupes de végétation	Description
Pessière à épinette noire (EE)	L'épinette noire constitue plus de 75 % de la surface terrière du peuplement.
Pessière à épinette noire et sapin baumier (ES)	L'épinette noire constitue 51 à 75 % de la surface terrière du peuplement et le sapin, 25 à 50 %.
Sapinière à épinette noire (SE)	Le sapin baumier constitue 51 à 75 % de la surface terrière du peuplement et l'épinette noire, 25 à 50 %.
Sapinière (SS)	Le sapin baumier constitue plus de 75 % de la surface terrière du peuplement.
Pessière à épinette noire et pin gris (EPG)	L'épinette noire et le pin gris constituent chacun plus de 25 % de la surface terrière du peuplement.
Pinède à pin gris (PGPG)	Le pin gris constitue plus de 75 % de la surface terrière du peuplement.
Peuplement constitué de feuillus intolérants à l'ombre (FI)	Le bouleau à papier et (ou) le peuplier faux-tremble constitue(nt) plus de 75 % de la surface terrière du peuplement.
Peuplement constitué d'un mélange de feuillus intolérants à l'ombre et de conifères (RFI)	Les conifères (sapin baumier, épinette noire, épinette blanche et (ou) pin gris) et les feuillus (bouleau à papier et (ou) peuplier faux-tremble) constituent chacun plus de 25 % de la surface terrière.
Autres	Le mélèze, le thuya et (ou) le pin blanc constituent plus de 25 % de la surface terrière du peuplement.

forme du terrain et sa position sur la pente. La cartographie des dépôts de surface est basée sur l'interprétation de photographies aériennes à l'échelle 1/40 000 et couvre l'ensemble du Québec au sud du 52^e parallèle (Robitaille et collab., 1994). La superficie occupée par les différentes catégories de dépôts de surface a été calculée pour chacun des blocs (tableau 1). Quelques descripteurs physiographiques, notamment l'altitude moyenne et la pente moyenne, ont aussi été considérés dans la description du relief. Ces informations proviennent de la Base de données topographiques du Québec (BDTQ; MRN, 1999). Les résultats sont exprimés sur une grille dont la résolution spatiale est de 50 m × 50 m.

Couvert forestier et perturbations

Le portrait du couvert forestier a été établi à partir des cartes écoforestières du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP) produites à l'aide de photographies aériennes (échelle 1/15 000) servant à la photo-interprétation des caractéristiques du couvert végétal, notamment la composition, la densité, la hauteur et l'âge des peuplements. Les analyses ont porté sur les cartes du 3^e inventaire écoforestier du Québec méridional réalisé de 1995 à 2003. Cet inventaire, même s'il est plus ancien, a été préféré au 4^e inventaire écoforestier produit de 2006 à 2015,

car il couvre un plus grand territoire et fournit un portrait du couvert végétal moins affecté par l'aménagement forestier.

Le territoire cartographié a d'abord été subdivisé selon les 4 grandes catégories de terrain à la base de la stratification écoforestière (MRNF, 2009). Il s'agit des terrains forestiers productifs, des terrains improductifs, des terrains à vocation non forestière (p. ex. : mines, lignes de transport d'énergie) et des étendues d'eau. Les terrains forestiers productifs se distinguent des terrains improductifs par leur capacité à produire 30 m³ ou plus de matière ligneuse à l'hectare en moins de 120 ans et leur recouvrement supérieur à 25 %. Pour les besoins de la présente étude, les terrains improductifs ont été divisés en deux groupes : 1) les milieux humides, qui comprennent les tourbières, les marais et les aulnaies et 2) les milieux bien drainés qui regroupent, notamment, les pessières à lichens (figure 2a), les arbustaies et les lichénaies.

La composition des milieux forestiers productifs a ensuite été inventoriée dans chacun des blocs en comptabilisant la superficie occupée par 9 groupes de végétation correspondant aux principaux types de forêts du domaine de la pessière noire à mousses (tableau 2; figures 2b à 2f). Comme la composition du couvert végétal est décrite seulement dans les peuplements forestiers dont la hauteur des tiges est égale ou supérieure à 7 m, ceux dont la hauteur est

inférieure à ce seuil ont été réunis en 4 groupes désignés selon le type de perturbation dont ils sont issus: brûlis, épidémies d'insectes, chablis ou coupes forestières et plantations.

L'âge des peuplements a été décrit en comptabilisant, pour chaque bloc, la superficie couverte des 3 classes de stade de développement (jeune, intermédiaire et mature) de la végétation forestière. Ces classes ont été définies en fonction de l'âge des peuplements des cartes écoforestières

(MRNF, 2009), déterminé par photo-interprétation en considérant la hauteur des arbres et le temps écoulé depuis la dernière perturbation. Les jeunes forêts sont constituées de peuplements en régénération âgés de 40 ans et moins, tandis que les forêts intermédiaires et les forêts matures correspondent respectivement aux peuplements âgés de 40 à 100 ans et aux peuplements de plus de 100 ans.

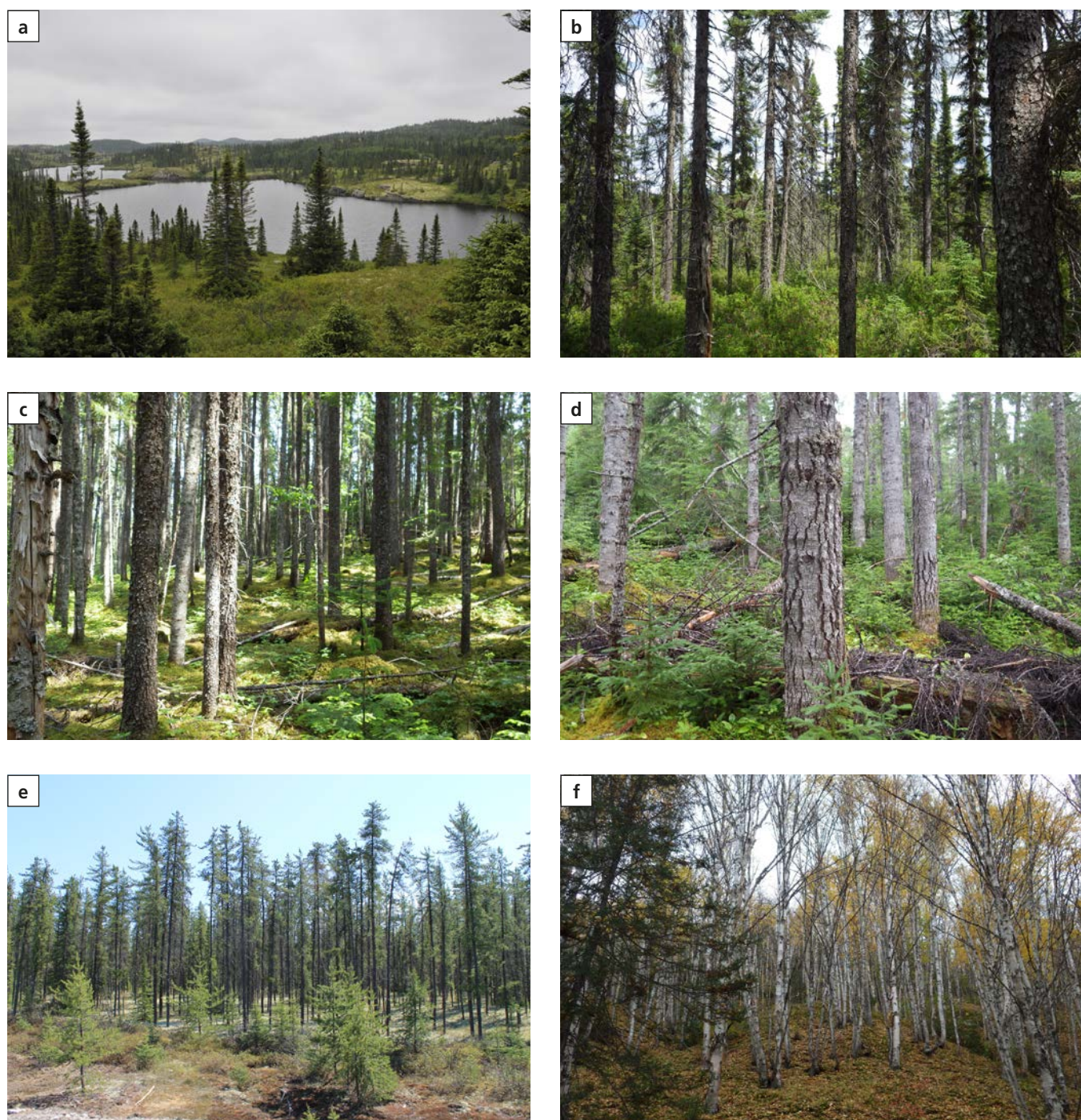


Figure 2. a) Pessière à lichens au nord de Havre-Saint-Pierre, sur la Côte-Nord, b) pessière à épinette noire au nord de Chibougamau, c) pessière à épinette noire et sapin baumier près du réservoir Manicouagan, d) sapinière au nord de Havre-Saint-Pierre, sur la Côte-Nord, e) pinède à pin gris au nord du Lac-Saint-Jean et f) bétulaie à bouleau à papier au nord de Havre-Saint-Pierre, sur la Côte-Nord.

Afin de mettre en relation l'ensemble des variables le long du transect, une analyse en composantes principales a été réalisée à l'aide de la fonction rda de l'extension vegan (Oksanen et collab., 2017) du logiciel R (R Development Core Team, 2011). Les données ont été soumises à une analyse de groupement (*k*-Means).

Résultats

Climat

La température moyenne annuelle varie de 2,6 °C dans l'ensemble du transect. Elle est respectivement de -1 °C et 0 °C aux extrémités ouest et est, mais s'abaisse à -2,6 °C au centre du territoire (bloc 25; figure 3). La température moyenne maximale des mois de juin, juillet et août atteint 20,1 °C dans l'ouest et diminue à 16,5 °C sur la Côte-Nord. La température minimale moyenne enregistrée au cours de la période estivale varie peu le long du transect, allant de 6,6 à 8 °C. La température maximale moyenne des mois de décembre, janvier et février est de -12,3 °C dans la partie ouest du transect, alors qu'elle diminue à -13 °C dans la partie centrale, puis remonte jusqu'à -8 °C sur la Côte-Nord. La température minimale moyenne pour cette période de l'année suit les mêmes tendances, soit environ -24 °C dans l'ouest, -25 °C au centre et -18 °C dans la partie est du transect.

Les précipitations annuelles totales augmentent d'ouest (825-950 mm) en est (1000-1 050 mm; figure 3). Celles des mois de juin, juillet et août varient d'un endroit à l'autre, de 280 à 335 mm. Les valeurs les plus élevées sont atteintes au centre du transect alors que les plus faibles caractérisent les extrémités ouest et est. Les précipitations des mois de décembre, janvier et février sont les plus élevées dans l'est (235 mm) et minimales dans l'ouest (145 mm).

Caractéristiques du milieu physique

L'altitude moyenne augmente graduellement depuis l'ouest jusqu'au centre du transect, où elle atteint 750 m, pour ensuite diminuer de nouveau vers l'est, atteignant 225 m près de la rivière Natashquan (bloc 57; figure 3). De nombreux sommets culminant à plus de 800 m d'altitude se trouvent dans la partie centrale, entre le lac Manouane et la rivière Manitou (blocs 23 à 43). Les terrains situés à basse altitude (< 100 m) correspondent au lit des principales rivières de la Côte-Nord (Sainte-Marguerite, Moisie, Manitou, Magpie, Mingan, Romaine, Aguanish et Natashquan). En raison de la présence de hautes collines et de vallées profondes, la pente moyenne augmente d'ouest en est: elle est inférieure à 4° dans l'ouest, tandis qu'elle varie entre 6° et 11° sur la Côte-Nord (figure 3).

Les dépôts glaciaires (minces et épais) sont les plus répandus. Ils couvrent 60 à 89 % de la superficie terrestre de chacun des blocs (figure 4). Les dépôts glaciaires de l'ouest du transect sont plus épais que ceux de l'est. Une mince couverture de till, généralement de moins de 50 cm d'épaisseur, recouvre partiellement le socle rocheux de la partie est du transect. Les affleurements rocheux couvrent

jusqu'à 17 % de la superficie terrestre de certains blocs de la Côte-Nord. L'ensemble de la région est traversé par plusieurs grands cours d'eau orientés nord-sud où le fond des vallées est généralement recouvert de dépôts fluvioglaciaires. Les plus grandes étendues de ce type de dépôt se trouvent à la marge ouest du lac Mistassini (blocs 7 et 8) et à la marge est du lac Manouane (bloc 23), de même que le long des rivières Outardes (bloc 27) et Manicouagan (bloc 29). Les dépôts organiques, constitués essentiellement de tourbe, abondent dans la partie ouest du transect. Ils occupent jusqu'à 32 % de la superficie de certains blocs en périphérie du lac Mistassini (blocs 10 et 11), tandis que vers l'est, ils sont nettement moins répandus, couvrant environ 3 % du milieu terrestre.

Couvert forestier

Les forêts productives sont les plus répandues (figure 5). Elles occupent plus de 70 % de chaque bloc, à l'exception des blocs 8, 9 et 10 où le lac Mistassini couvre une grande surface. Pour leur part, les milieux improductifs représentent souvent plus de 20 % de la superficie des blocs. Ces derniers consistent surtout en des milieux humides à l'ouest du lac Mistassini, alors que les milieux improductifs bien drainés, notamment les pessières à lichens, abondent sur la Côte-Nord où ils représentent parfois plus 15 % de la surface à l'est de Sept-Îles (bloc 39). Les milieux anthropisés et autres terrains à vocation non forestière sont partout peu répandus (< 2 %).

Le couvert forestier se compose principalement de forêts de conifères dominées par l'épinette noire (*Picea mariana*) (figure 6). Cette espèce pousse souvent en peuplement pur. Les pessières à épinette noire (EE) occupent généralement plus de 50 % de la superficie forestière dans les parties ouest et centrale du transect, tandis qu'elles représentent environ 20 % du couvert végétal à l'est de la rivière Magpie (bloc 43). L'épinette noire partage habituellement la dominance des peuplements avec le sapin baumier (*Abies balsamea*) dont l'abondance s'accroît vers l'est, surtout à partir du secteur situé à l'est du lac Manouane (bloc 23). Les peuplements de la Côte-Nord sont d'ailleurs majoritairement formés d'un mélange des deux espèces. Les pessières à épinette noire et sapin baumier (ES) sont généralement deux fois plus abondantes que les sapinières à épinette noire (SE), sauf à l'extrémité est du transect où les deux types de forêts couvrent approximativement la même surface, soit le tiers du couvert forestier chacun. Dans la partie ouest du transect, les pessières à épinette noire et sapin baumier occupent moins de 5 % de la superficie forestière à l'ouest du lac Mistassini (bloc 8), et de 10 à 20 % du lac Mistassini jusqu'au lac Manouane. La sapinière à épinette noire est quasi absente à l'ouest du lac Mistassini et couvre moins de 5 % de la partie centrale. Il en est de même des sapinières pures (SS): elles sont généralement peu abondantes (< 3 % de la superficie forestière) jusqu'à Sept-Îles, mais elles augmentent progressivement vers l'est par la suite, pour atteindre 20 % de la superficie forestière entre Havre-Saint-Pierre et Natashquan (blocs 53 et 54). L'épinette noire se trouve aussi fréquemment avec le pin gris (*Pinus banksiana*) dans l'extrémité ouest du transect, où les

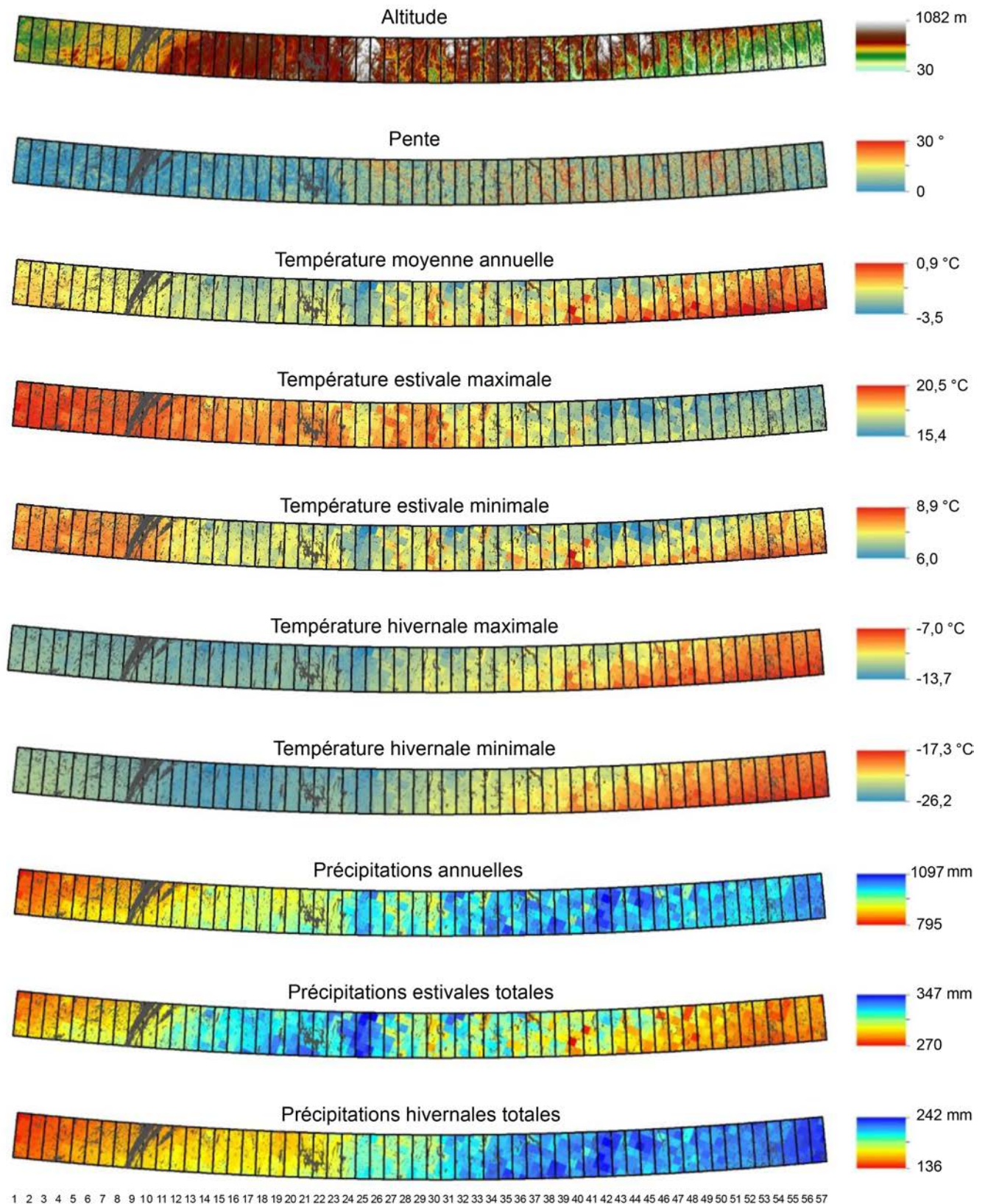


Figure 3. Altitude, pente et normales climatiques calculées dans les 57 blocs à partir de données quotidiennes de température et de précipitations recueillies au cours de la période 1971-2000. Les données estivales correspondent aux mois de juin, juillet et août. Les données hivernales correspondent au mois de décembre, janvier et février.

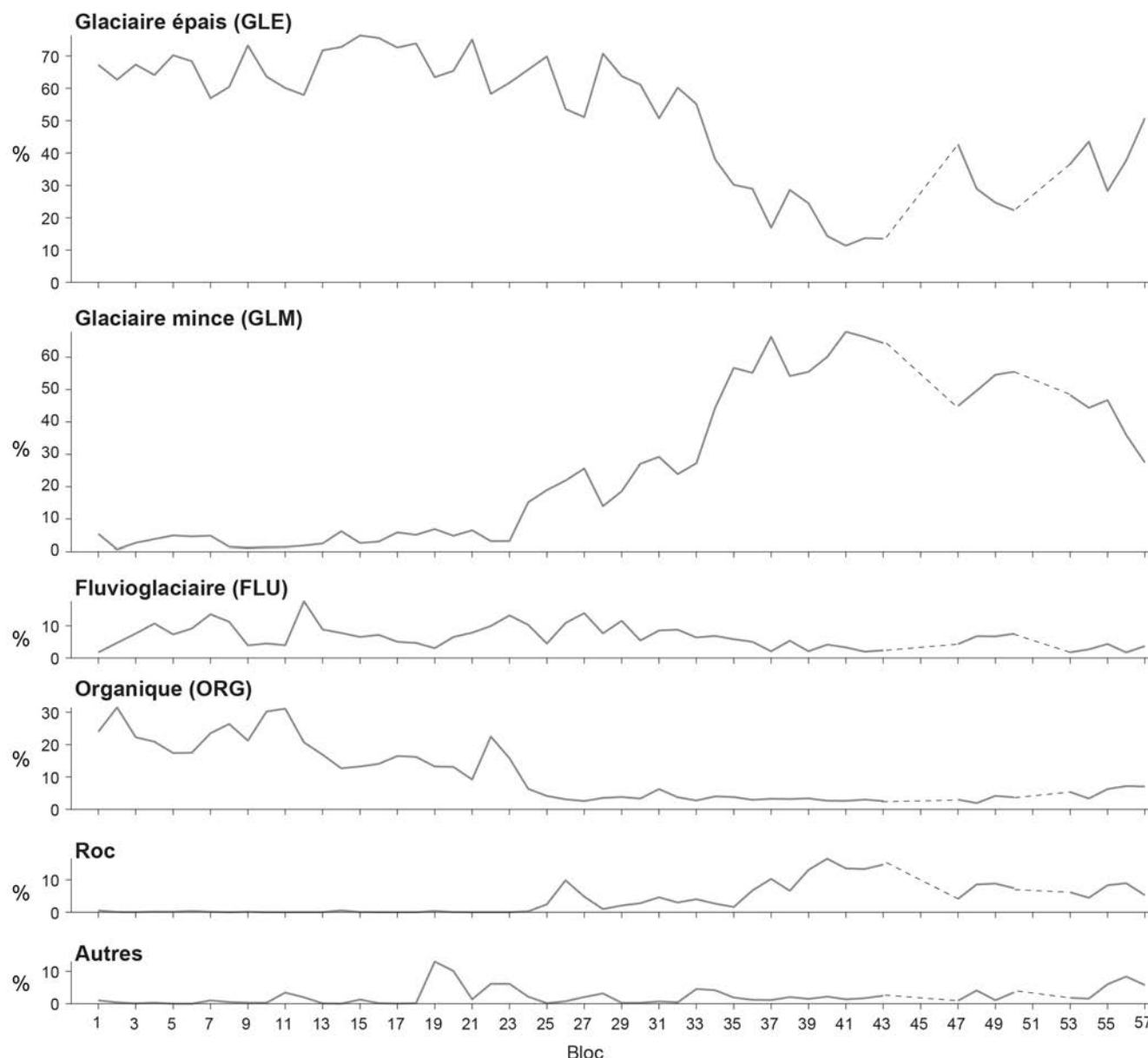


Figure 4. Répartition spatiale de la représentation des principaux types de dépôts de surface. Les sections en traits tiretés correspondent aux zones qui n'ont pas été cartographiées.

peuplements mixtes (pessière à épinette noire et pin gris, EPG) représentent le principal type de forêt au sein des blocs 1 à 3. Leur abondance diminue fortement à l'est du lac Mistassini, sauf dans le secteur avoisinant le lac Manouane où ces peuplements couvrent plus de 10 % de la superficie. Les forêts renfermant du pin gris sont, sauf exception, absentes à l'est de la rivière Moisie (bloc 40). Les pinèdes à pin gris (PGPG) suivent la même tendance que celle de la pessière à épinette noire et pin gris, mais elles couvrent de plus petites superficies. Dans la partie ouest du transect, où elles sont les plus étendues, elles dépassent rarement 10 % de la superficie forestière.

Les forêts de feuillus sont partout peu représentées (< 4 % de la superficie forestière). Elles sont principalement constituées de bouleau à papier (*Betula papyrifera*), parfois

accompagné de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*). Les peupleraies pures sont rares et se trouvent principalement sur les plaines alluviales de quelques rivières. Les forêts mixtes, composées d'épinette noire ou de sapin baumier et accompagnées de bouleau à papier, sont plus répandues, mais elles dépassent rarement 10 % de la superficie forestière. Des pessières à épinette noire et à bouleau à papier poussent dans les parties ouest et centrale du transect, tandis que les sapinières à bouleau à papier sont plus fréquentes dans l'est.

Perturbations

Les peuplements forestiers requièrent environ 40 ans pour atteindre une hauteur de 7 m. Ceux n'ayant pas encore atteint cette hauteur sont surtout nombreux à l'extrémité ouest

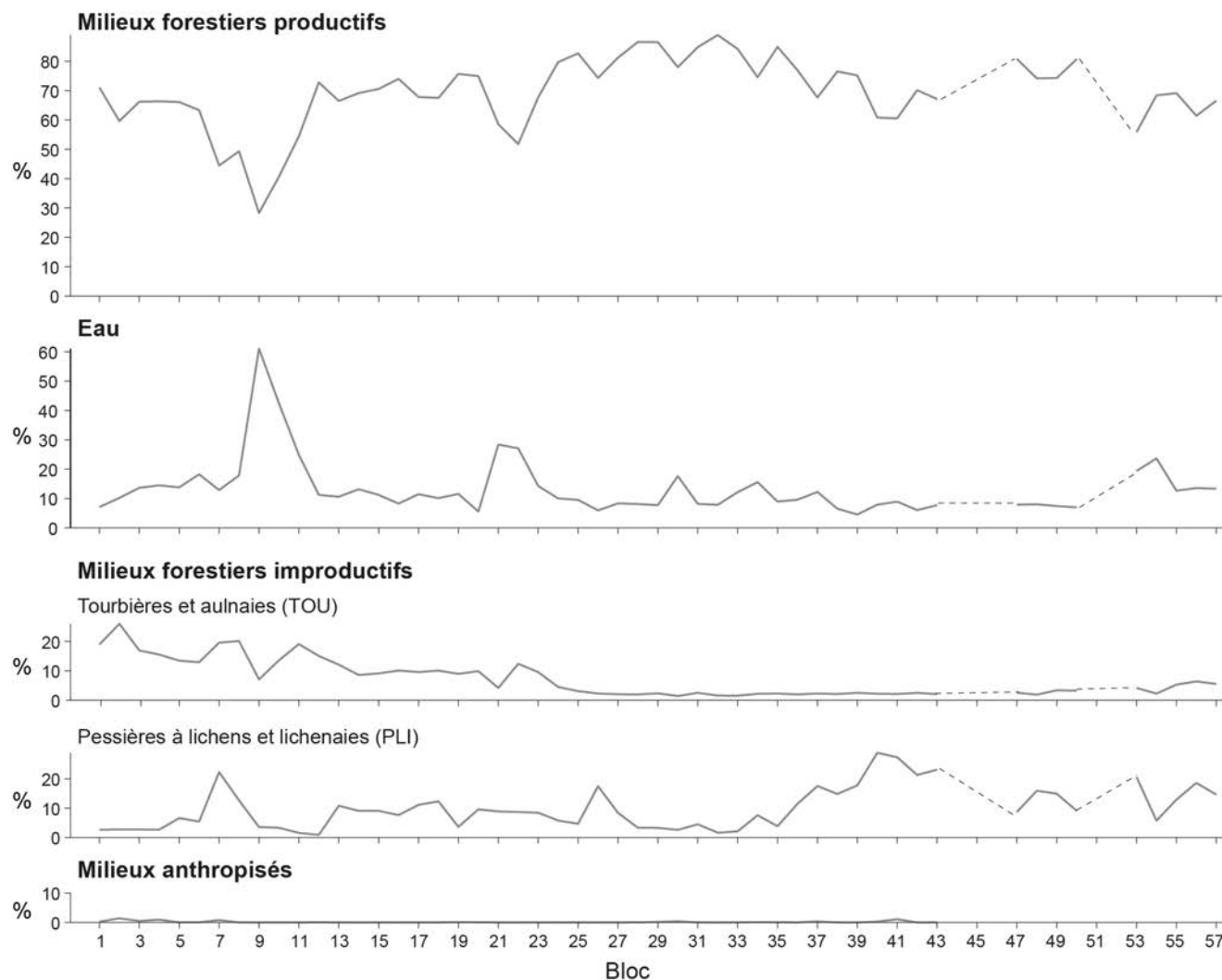


Figure 5. Répartition spatiale des principaux types de terrain. Les sections en traits tiretés correspondent aux zones qui n'ont pas été cartographiées.

du transect, où ils couvrent plus de 20 % de la superficie des blocs 1 à 8, 18 et 19 (figure 7). Ailleurs, ils dépassent rarement 10 % de la superficie forestière. Dans l'ouest, la grande majorité de ces peuplements sont issus de feux, tandis que dans l'est (à partir du bloc 47), ils ont surtout succédé à des épidémies d'insectes et à des chablis, bien que ces perturbations couvrent de plus petites surfaces que les feux (figure 7). De façon générale, les coupes forestières occupent de petites superficies, mais dépassent 10 % au nord de Chibougamau (blocs 5 à 7) et de Port-Cartier (blocs 35 et 36).

La distribution de l'âge des peuplements varie aussi le long du transect (figure 8). Les jeunes forêts sont surtout abondantes dans les blocs 1 à 8, où elles couvrent en moyenne plus de 40 % du couvert forestier. La grande majorité de ces peuplements sont issus des nombreux feux qui ont affecté cette région au cours des 40 dernières années. Plus à l'est, la proportion occupée par les jeunes peuplements chute abruptement à cause d'une moins grande fréquence des feux au cours de cette même période. Elle se situe sous le seuil de 10 %, à l'exception de quelques blocs.

Les peuplements intermédiaires, de structure équiennne, sont aussi plus abondants à l'extrémité ouest du transect, couvrant en moyenne près de 40 % de la superficie forestière. Leur abondance diminue aussi progressivement vers l'est, où elle demeure plus grande que celle des jeunes forêts, dépassant souvent 20 % de la superficie forestière, à l'exception de l'extrémité est du transect (à partir du bloc 41) où elle est rarement supérieure à 10 %. Ces forêts se sont régénérées principalement après les grands feux survenus au début du 20^e siècle. Les peuplements âgés de plus de 100 ans correspondent au stade de développement le plus fréquent. À l'exception de l'extrémité ouest du transect où ils ne dépassent pas 20 % du couvert forestier, ils représentent la plupart du temps plus de 70 % de la superficie forestière, et même 80 % à l'est de Sept-Îles (bloc 39).

Analyses de groupement

L'analyse en composantes principales met en relation l'ensemble des variables décrites précédemment (figure 9). Les 57 blocs s'alignent de façon naturelle dans le plan formé

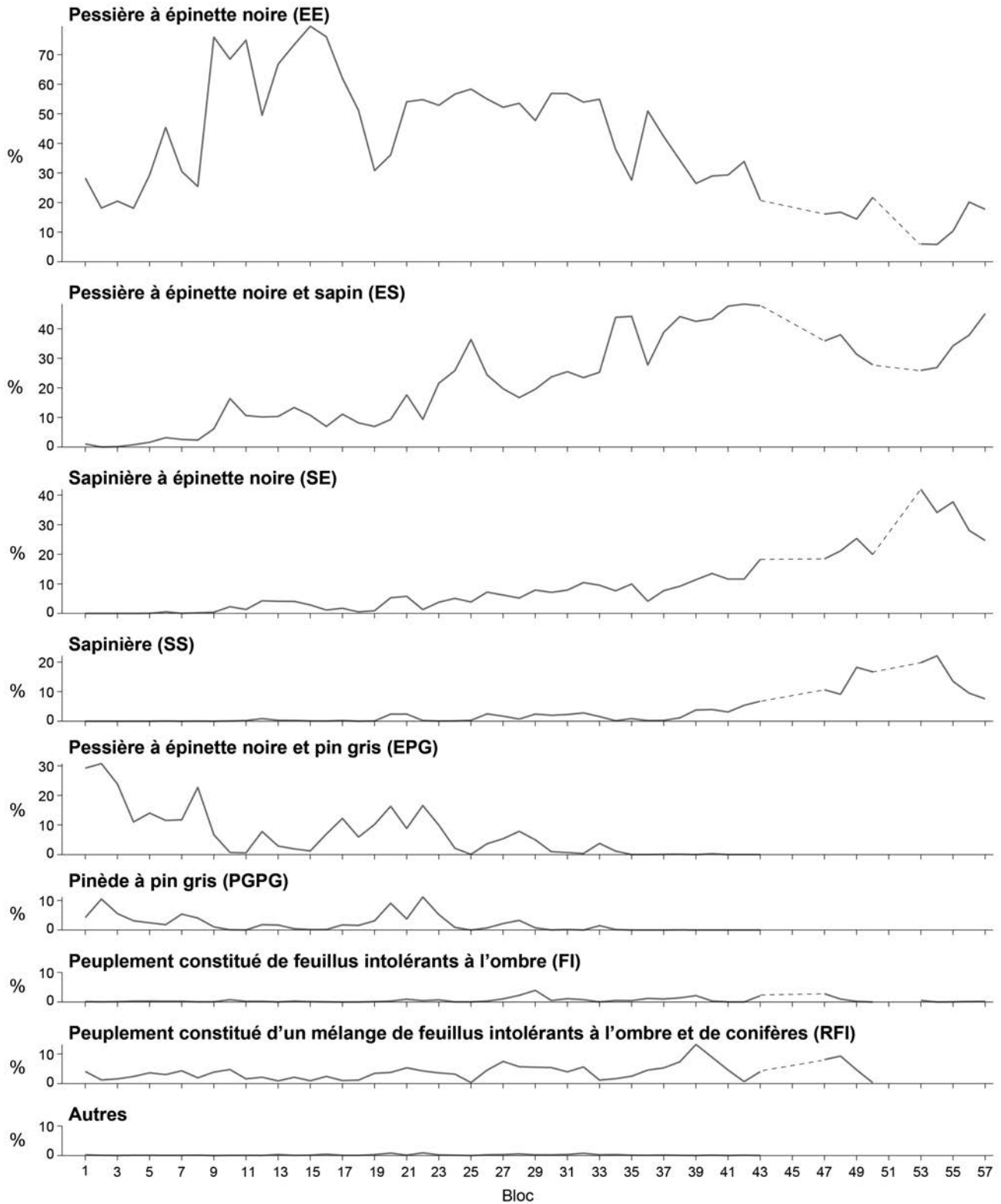


Figure 6. Répartition spatiale de la composition des forêts productives (peuplement de hauteur ≥ 7 m). Les sections en traits tiretés correspondent aux zones qui n'ont pas été cartographiées.

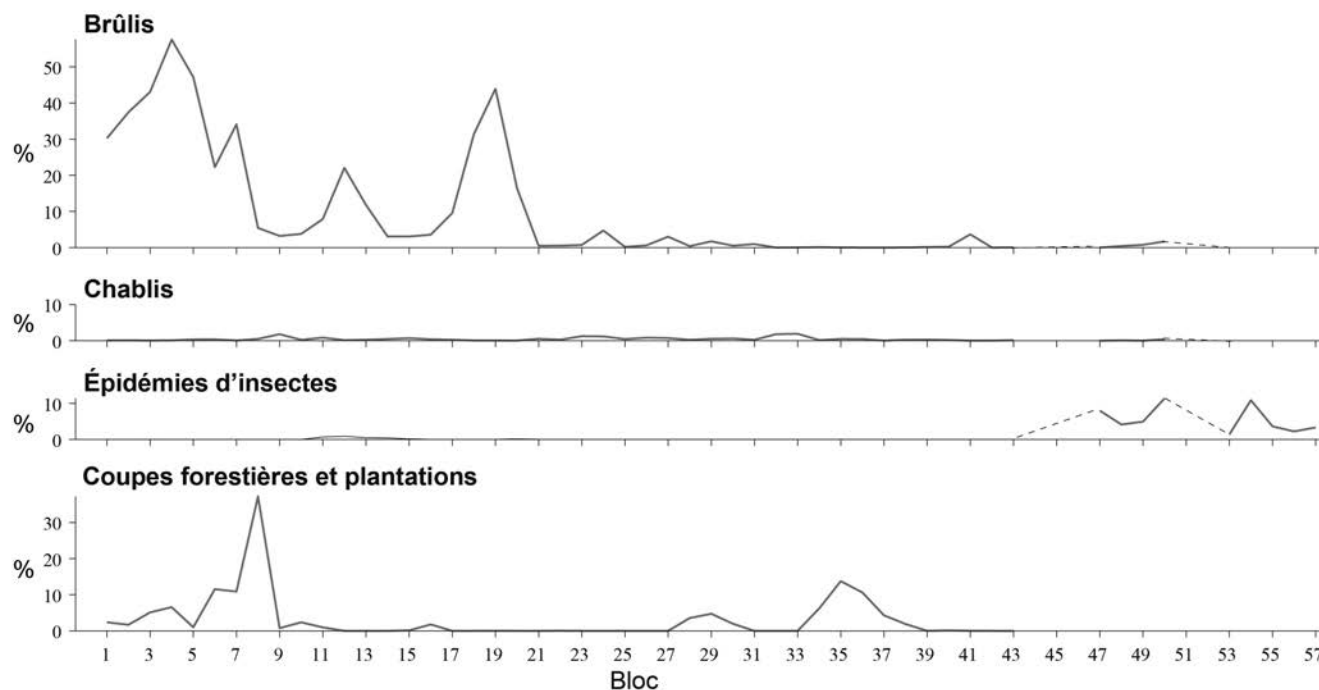


Figure 7. Répartition spatiale de l'origine des forêts productives (peuplements de hauteur < 7 m). Les sections en traits tirés correspondent aux zones qui n'ont pas été cartographiées.

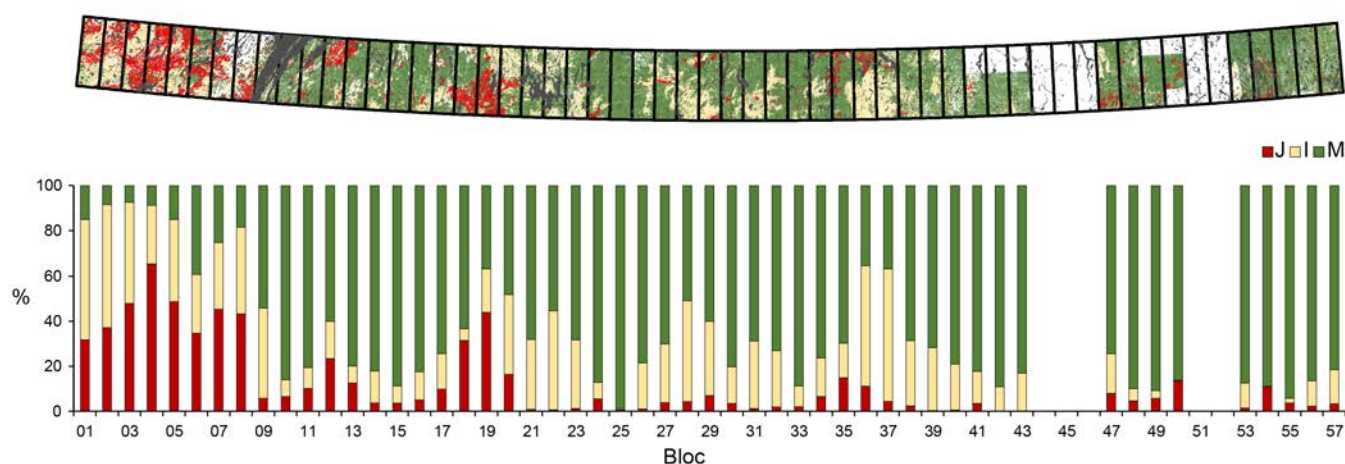


Figure 8. Distribution de l'âge des peuplements. Les jeunes forêts (J) sont constituées de peuplements en régénération âgés de 40 ans et moins, les forêts intermédiaires (I), de peuplements âgés de 40 à 100 ans et les forêts matures (M), de peuplements de plus de 100 ans.

par les deux premiers axes de l'analyse. Le premier axe (45 %) montre d'abord la relation entre les peuplements dominés par le pin gris, les feux, la température estivale élevée et les dépôts organiques et, ensuite, celle entre les sapinières, les dépôts minces, les pentes fortes et les précipitations hivernales élevées. Le deuxième axe (20,5 %) exprime plutôt le gradient altitudinal et celui des précipitations estivales. L'analyse de groupement *k*-means a permis de distinguer 5 grands secteurs (ou groupes) qui se caractérisent par le climat, les caractéristiques physiographiques, les perturbations et la végétation.

Le premier secteur correspond aux blocs 1 à 8, situés à l'ouest du lac Mistassini. Il est caractérisé par une topographie peu accidentée ponctuée de quelques collines de till peu pentues. L'altitude moyenne varie de 330 à 410 m. De grandes tourbières occupent les nombreuses dépressions topographiques. Le climat de ce secteur est le plus continental, avec les températures maximales les plus élevées en été et les températures minimales les plus basses en hiver. Les précipitations annuelles sont les plus faibles de l'ensemble du transect. C'est le secteur qui a été le plus touché par les incendies au cours des 4 dernières décennies : 38 % de la

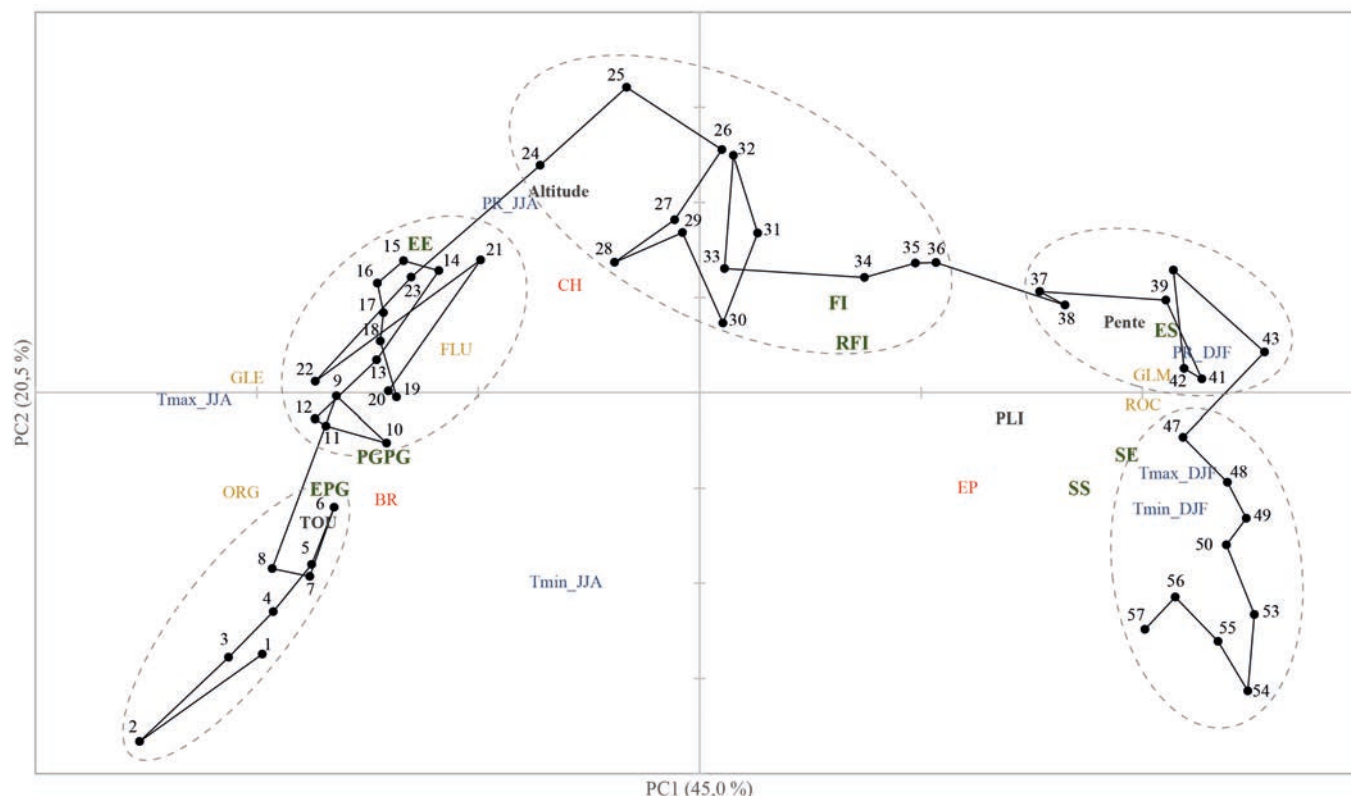


Figure 9. Évolution du gradient écologique dans le plan formé par les deux premiers axes de l'analyse en composantes principales effectuée sur une matrice décrivant chacun des 57 blocs (points noirs) par rapport aux principales variables utilisées dans cette étude. Les abréviations en jaune font référence aux principaux types de dépôt de surface, celles en noir, aux catégories de terrain, celles en vert, à la composition forestière, celles en rouge, aux perturbations et celles en bleu, aux variables climatiques. Les 5 grands secteurs (ellipses pointillées) ont été formés à partir d'une analyse de groupement *k*-Means.

superficie de certains blocs a été affectée, ce qui explique la rareté de peuplements âgés. Le pin gris et l'épinette noire dominent le couvert végétal. C'est d'ailleurs dans ce secteur que le pin gris atteint sa plus grande abondance.

Le second secteur, qui couvre la région sise au nord du lac Saint-Jean, entre les lacs Mistassini (bloc 9) et Manouane (bloc 23), est le plus étendu longitudinalement. Le relief est peu accidenté et consiste en des collines recouvertes de dépôts de till épais. L'altitude moyenne est plus élevée comparativement à celle du secteur précédent (435-560 m). Le climat est semblable à celui du premier secteur, quoique l'écart entre les températures estivales et hivernales s'amenuise et les précipitations augmentent légèrement. Plusieurs feux sont aussi survenus, notamment aux abords de la rivière Péribonka dans les régions représentées par les blocs 18 et 19. Le couvert forestier est surtout dominé par la pessière à épinette noire. Le pin gris est abondant localement sur les terrasses de sable fluvioglaciaire. Les peuplements âgés de plus de 100 ans sont nettement plus abondants que dans le premier secteur.

Le troisième secteur correspond aux blocs 24 à 36, entre le lac Manouane et la rivière Moisie. Le relief est accidenté et formé de hautes collines, dont certaines culminent à plus de 1000 m. Il s'agit du secteur le plus élevé en altitude. Le climat est plus frais, avec des précipitations abondantes, surtout en

période estivale. Les feux y sont moins fréquents que dans les deux secteurs précédents. L'épinette noire domine toujours le couvert forestier, mais elle partage la dominance avec le sapin baumier pour former des pessières à épinette noire et à sapin baumier. Bien que peu abondants, le bouleau à papier et le peuplier faux-tremble y atteignent néanmoins leur maximum de représentation.

Le quatrième secteur correspond aux blocs 37 à 43 et s'étend de la rivière Moisie au lac Manitou. Le relief, particulièrement accidenté, consiste en de hautes collines. L'altitude moyenne varie de 400 à 570 m. Les pentes fortes (> 17°) sont nombreuses, et les escarpements rocheux, fréquents le long des vallées. Le till est mince et recouvre partiellement le socle rocheux. Le climat est plus chaud et l'écart entre les températures estivales et hivernales s'amenuise. Les précipitations sont particulièrement abondantes en hiver. Les épidémies d'insectes et les chablis y sont les principales perturbations naturelles. La pessière à épinette noire et à sapin baumier constitue le type de peuplement le plus caractéristique des sites mésiques de ce secteur. On trouve aussi plusieurs forêts improductives (forêts ouvertes à lichens) poussant sur des sols minces bien drainés. C'est d'ailleurs en raison de la grande étendue de ces forêts ouvertes que la cartographie forestière n'a pas été réalisée dans les blocs 44 à 46.

Le cinquième et dernier secteur est situé entre le lac Magpie et la rivière Natashquan (blocs 47 à 57). Il est caractérisé par un relief accidenté formé de collines recouvertes d'une mince couche de till. Les températures moyennes annuelles les plus chaudes sont enregistrées dans ce secteur. L'altitude est moins grande que précédemment et varie de 225 à 340 m. Le sapin baumier est l'espèce dominante. Les sapinières et les sapinières à épinette noire constituent les peuplements forestiers les plus répandus. Ces dernières ont été affectées par des épidémies d'insectes au cours des dernières décennies, dont celle de l'arpenteuse de la pruche (*Lambdina fuscicornis* Guenée) survenue de 1998 à 2002. C'est dans ce secteur que la surface occupée par les forêts âgées de plus de 100 ans est la plus grande.

Discussion

Un contraste climatique important distingue les parties ouest et est du domaine de la pessière noire à mousses. Le climat de la partie ouest est continental et moins arrosé que celui de la partie est, qui est sous influence maritime en raison de sa proximité avec le golfe du Saint-Laurent et l'océan Atlantique (Proulx et collab., 1987). Les conditions climatiques, qui varient considérablement le long du gradient longitudinal, se manifestent sur le plan écologique par des différences marquées du couvert forestier et du régime des feux.

Contrairement à ce que l'on aurait pu penser, une fréquence des feux moindre dans la partie orientale du transect ne correspond pas à une augmentation marquée des précipitations estivales. En effet, les précipitations enregistrées au cours des mois de juin, de juillet et d'août se comparent à celles de l'ouest (285 vs 290 mm). D'autres variables climatiques, comme une température estivale plus fraîche et une forte humidité relative, contribuent à atténuer l'incidence des feux sur la Côte-Nord. La foudre, qui est responsable de l'allumage de la plupart des feux en forêt boréale (Stocks et collab., 2003; Veraverbeke et collab., 2017), est aussi moins fréquente dans l'est. Les données d'Environnement Canada (2018) indiquent, en effet, que le nombre annuel d'éclairs enregistré à Sept-Îles, près du golfe du Saint-Laurent ($n = 145$) est beaucoup moins élevé que celui de la région de Chibougamau, au climat continental ($n = 440$). Les brouillards fréquents en été sur la Côte-Nord (Hufty, 1968), qui occasionnent des conditions fraîches et humides, sont un autre facteur défavorable à l'allumage et à la propagation des feux. En contrepartie, dans la partie ouest du transect, les températures estivales plus élevées créent des conditions favorables aux feux. Ceux-ci sont plus nombreux et se propagent rapidement lorsque les conditions sont chaudes et sèches (Johnson, 1992; Skinner et collab., 2001; Westerling et collab., 2003). Enfin, la couverture neigeuse, moins abondante dans l'ouest du Québec, contribue aussi à accroître le risque de feu en réduisant la teneur en eau des sols au printemps (Girardin et collab., 2006).

Le régime des feux variable au sein du domaine de la pessière à mousses entraîne des modifications de la composition du couvert végétal. L'un de ces changements est la disparition du pin gris à l'est de Sept-Îles. La présence de

cette espèce est liée de près à l'occurrence des feux. Le pin gris est très bien adapté au feu, grâce au sérotinisme de ses cônes qui retiennent les graines matures. La chaleur dégagée lors d'un incendie forestier favorise l'ouverture des cônes sérotineux et la dispersion massive des graines qui assurent alors la régénération du peuplement (Despots et Payette, 1992; Gauthier et collab., 1993). Les milieux propices au pin gris, comme les terrasses de sable fluvioglaciaire et les collines rocheuses couvertes de tills minces, sont progressivement occupés vers l'est par l'épinette noire. Il en résulte une diminution de la diversité du couvert forestier, puisque l'épinette noire domine déjà la plupart des autres milieux (mésique et humide). Plusieurs études ont montré le rôle fondamental joué par le feu dans la diversité des écosystèmes (Bowman et collab., 2009; Pausas et Ribeiro, 2017). Les feux retardent l'exclusion compétitive au cours de la succession des peuplements, augmentent l'hétérogénéité des paysages et créent de nouvelles niches permettant l'établissement d'un plus grand nombre d'espèces végétales (Pausas et Ribeiro, 2017).

Les feux causent aussi des changements dans la distribution de l'âge des peuplements au sein du paysage forestier. Leur fréquence, leur étendue et leur ampleur déterminent une séquence successione de communautés végétales, allant des jeunes peuplements après feu aux vieux peuplements (Bergeron et collab., 2004; Heinselman, 1973; Payette et collab., 1989; Weir et collab., 2000). La fréquence plus élevée des feux dans la partie ouest du domaine de la pessière à mousses favorise la formation d'une mosaïque forestière hétérogène, composée d'un ensemble de peuplements dont la distribution des classes d'âge diminue en superficie selon une courbe s'apparentant à une exponentielle négative (Couillard et collab., 2016; Le Goff et collab., 2007). Une telle distribution montre un grand nombre de jeunes peuplements, un nombre décroissant de peuplements plus âgés ainsi qu'un très petit nombre de vieux peuplements ayant survécu aux feux depuis longtemps. La diminution marquée de la fréquence des feux à l'est du lac Mistassini fait en sorte que les paysages deviennent presque exclusivement constitués de forêts âgées de plus de 100 ans. À l'est de Sept-Îles, la structure inéquienne d'un grand nombre de ces forêts laisse croire que plusieurs d'entre elles sont très âgées et n'ont pas connu de perturbations successione profondes depuis plusieurs centaines d'années (Couillard et collab., 2018; Pollock et Payette, 2010; Ward et collab., 2014).

Le gradient longitudinal du régime de feu dans la pessière noire à mousses se manifeste aussi par une augmentation, vers l'est, des superficies occupées par les forêts improductives. En effet, les pessières à lichens (figure 2a) et les lichénaires deviennent de plus en plus abondantes à l'est de Sept-Îles. Ces écosystèmes se seraient formés à la suite de l'ouverture d'anciennes forêts fermées (Payette et Delwaide, 2018). Le processus menant à une telle transformation a été documenté ailleurs au Québec, notamment au nord du lac Saint-Jean (Côté et collab., 2013; Girard et collab., 2008; 2009; 2011) et au parc national des Grands-Jardins, dans la région de Charlevoix (Jasinski et Payette, 2005; Payette et collab.,

2000). L'ouverture des forêts implique l'influence de différents facteurs causaux (épidémies d'insectes défoliateurs, feux et coupes) agissant en synergie et qui provoquent une chute de la régénération (Payette et Delwaide, 2003). Par exemple, une épidémie d'insectes qui affecte un peuplement forestier diminue fortement la production de graines, et ce, durant plusieurs années (Morin et Laprise, 1990). Si un feu survient durant cette même période, la forêt dense d'origine risque de s'ouvrir graduellement et, ultimement, se transformer en une pessière à lichens (Payette et collab., 2000). Le passage de feux successifs au cours d'un intervalle de temps trop court pour que les arbres atteignent la maturité sexuelle peut aussi provoquer une diminution de la régénération forestière (Lavoie et Sirois, 1998). Par contre, étant donné la faible fréquence des feux dans la région de la Côte-Nord, il est peu probable que les perturbations successives soient le principal facteur impliqué dans l'ouverture des forêts. La transformation de la forêt fermée en pessière à lichens semble plutôt attribuable au fait que les feux ne parviennent pas à consumer l'épaisse couche de débris organiques, généralement composée d'éricacées, qui caractérise un grand nombre de forêts de cette région. La couche de matière organique noircie qui en résulte est défavorable à la survie des plantules d'épinette noire, ce qui mène ensuite à l'ouverture de la forêt (Veilleux-Nolin et Payette, 2012). Le nombre de niches favorables à la survie des plantules est aussi largement réduit dans l'est de la pessière, en raison de la diminution marquée des substrats humides dominés par la sphaigne qui fournissent l'un des meilleurs lits de germination pour les semences (Boiffin et Munson, 2013; Veilleux-Nolin et Payette, 2012).

Les changements des conditions écologiques qui surviennent le long du gradient longitudinal permettent d'identifier 5 secteurs qui se distinguent en fonction du climat, des caractéristiques physiographiques, des perturbations et de la végétation. Certains secteurs sont similaires à des zones écologiques décrites dans différents travaux de classification écologique. Par exemple, la limite entre les 2 sous-domaines bioclimatiques du système de classification écologique du MFFP (Saucier et collab., 2011) correspond à la jonction entre les secteurs 2 et 3 près du lac Manouane. Le lac Mistassini, situé à la jonction entre les secteurs 1 et 2, correspond aussi à une limite écologique décrite dans les travaux de classification des unités homogènes (Grondin et collab., 2007). En contrepartie, les secteurs plus à l'est ne sont pas mis clairement en évidence dans les travaux de classification écologique, ces derniers donnant plutôt préséance aux changements de végétation qui surviennent depuis la côte (estuaire et golfe du Saint-Laurent) vers l'intérieur du continent.

Conclusion

La structure écologique et la composition floristique du domaine bioclimatique de la pessière noire à mousses au Québec varient fortement selon la longitude. Sur l'ensemble

de son parcours de 1 600 km, les conditions climatiques contrastées d'ouest en est causent une profonde différenciation du régime des perturbations et du couvert forestier. Notre analyse cartographique du portrait écologique du domaine de la pessière noire à mousses a permis de mettre en évidence une diminution de la diversité forestière et l'augmentation de la proportion des pessières à lichens et des lichénaires en progressant depuis l'ouest jusqu'à l'est. L'ampleur des changements montre qu'il est primordial de considérer le gradient longitudinal pour expliquer la répartition des formations végétales de la forêt boréale, au même titre que le gradient latitudinal qui, lui, est plus souvent étudié. Même si cette analyse se limite à la période contemporaine, elle nous laisse penser que les feux ont joué un rôle historique prépondérant dans la mise en place du gradient écologique ouest-est qui caractérise la végétation forestière. Afin d'en évaluer la portée, il faudrait acquérir des connaissances supplémentaires sur le régime des feux et le climat depuis la déglaciation à l'aide de techniques paléoécologiques permettant de reconstituer l'évolution des écosystèmes depuis la dernière glaciation.

En raison des changements climatiques en cours et anticipés, il est aussi important de comprendre les processus écologiques qui ont mis en place les écosystèmes afin de prédire leur évolution à différentes échelles de temps et d'espace. Il est de plus en plus admis que l'augmentation prévue des températures poussera certaines espèces vers le nord et modifiera leur aire de répartition. Toutefois, il est beaucoup plus difficile de prédire l'effet des changements climatiques sur la répartition longitudinale des espèces, celle-ci dépendant davantage du gradient de précipitations. Dans ce contexte, le gradient longitudinal qui caractérise aujourd'hui la répartition de la végétation du domaine de la pessière noire à mousses demeurera-t-il aussi contrasté? Notre analyse cartographique de cette grande région est un premier pas pour tenter de répondre à cette question. L'étude de l'évolution de la végétation portant sur le climat et les feux au cours de l'Holocène permettra de mieux comprendre comment le domaine de la pessière noire à mousses pourrait changer face aux changements climatiques et du régime des perturbations de ce siècle.

Remerciements

Cette étude a été rendue possible grâce au financement accordé par le ministère des Forêts de la Faune et des Parcs par le biais du Fonds vert (Action 27.5 – Vulnérabilité des forêts et des activités forestières aux changements climatiques). Nous avons apprécié la collaboration de Valérie Roy et Ann Delwaide pour leur aide lors de la confection des figures. Nous remercions les deux évaluateurs anonymes dont les commentaires et suggestions ont permis d'améliorer la première version du manuscrit, ainsi que toute l'équipe du *Naturaliste canadien* pour le travail d'édition. ◀

Références

- BERGERON, Y., S. GAUTHIER, M. FLANNIGAN et V. KAFKA, 2004. Fire regimes at the transition between mixedwood and coniferous boreal forest in northwestern Quebec. *Ecology*, 85: 1916-1932.
- BOIFFIN, J. et A.D. MUNSON, 2013. Three large fire years threaten resilience of closed crown black spruce forests in eastern Canada. *Ecosphere*, 4: art. 56.
- BOUCHARD, M. et D. POTHIER, 2010. Spatiotemporal variability in tree and stand mortality caused by spruce budworm outbreaks in eastern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 40: 86-94.
- BOUCHARD, M., D. POTHIER et S. GAUTHIER, 2008. Fire return intervals and tree species succession in the North Shore region of eastern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 38: 1621-1633.
- BOWMAN, D.M.J.S., J.K. BALCH, P. ARTAXO, W.J. BOND, J.M. CARLSON, M.A. COCHRANE, C.M. D'ANTONIO, R.S. DEFRIES, J.C. DOYLE, S.P. HARRISON, F.H. JOHNSTON, J.E. KEELEY, M.A. KRAWCHUK, C.A. KULL, J.B. MARSTON, M.A. MORITZ, I.C. PRENTICE, C.I. ROOS, A.C. SCOTT, T.W. SWETNAM, G.R. VAN DER WERF et S.J. PYNE, 2009. Fire in the earth system. *Science*, 324: 481-484.
- CÔTÉ, D., F. GIRARD, F. HÉBERT, S. BOUCHARD, R. GAGNON et D. LORD, 2013. Is the closed crown boreal forest resilient after successive stand disturbances? A quantitative demonstration from a case study. *Journal of Vegetation Science*, 24: 664-674.
- COUILLARD, P.-L., M. FRÉGEAU, S. PAYETTE, P. GRONDIN, M. LAVOIE et J. LAFHAMME, 2016. Dynamique et variabilité naturelle de la pessière à mousses au nord de la région du Lac-Saint-Jean, Québec. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers, 35 p. Disponible en ligne à : <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/rapport-dynamique.pdf>.
- COUILLARD, P.-L., S. PAYETTE, M. LAVOIE et M. FRÉGEAU, 2018. Macrocharcoal-based chronosequences reveal shifting dominance of conifer boreal forests under changing fire regime. *Ecosystems*, 21: 1183-1195.
- DESPONTS, M. et S. PAYETTE, 1992. Recent dynamics of jack pine at its northern distribution limit in the northern Quebec. *Canadian Journal of Botany*, 70: 1157-1167.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 2018. Archives climatiques nationales du Canada. Disponible en ligne à : <http://climate.weatheroffice.gc.ca>. [Visité le 2018-05-15].
- GAUTHIER, S., Y. BERGERON et J.-P. SIMON, 1993. Cone serotiny in jack pine: ontogenetic, positional, and environmental effects. *Canadian Journal of Forest Research*, 23: 394-401.
- GIRARD, F., S. PAYETTE et R. GAGNON, 2008. Rapid expansion of lichen woodlands within the closed-crown boreal forest zone over the last 50 years caused by stand disturbances in eastern Canada. *Journal of Biogeography*, 35: 529-537.
- GIRARD, F., S. PAYETTE et R. GAGNON, 2009. Origin of the lichen-spruce woodland in the closed-crown forest zone of eastern Canada. *Global Ecology and Biogeography*, 18: 291-303.
- GIRARD, F., S. PAYETTE et R. GAGNON, 2011. Dendroecological analysis of black spruce in lichen-spruce woodlands of the closed-crown forest zone in eastern Canada. *Ecoscience*, 18: 279-294.
- GIRARD, F., L. DE GRANDPRÉ et J.-C. RUEL, 2014. Partial windthrow as a driving process of forest dynamics in old-growth boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 44: 1165-1176.
- GIRARDIN, M.P., J. TARDIF, M.D. FLANNIGAN et Y. BERGERON, 2006. Synoptic-scale atmospheric circulation and boreal Canada summer drought variability of the past three centuries. *Journal of Climate*, 19: 1922-1947.
- GRONDIN, P., J. NOËL et D. HOTTE, 2007. L'intégration de la végétation et de ses variables explicatives à des fins de classification et de cartographie d'unités homogènes du Québec méridional. Mémoire de recherche forestière n° 150, ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction de la recherche forestière, Québec, 62 p. Disponible en ligne à : <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Grondin-Pierre/Memoire150.pdf>.
- HEINSELMAN, M.L., 1973. Fire in the virgin forests of the Boundary Waters Canoe Area, Minnesota. *Quaternary Research*, 3: 329-382.
- HUFTY, A., 1968. Les climats thermiques du Québec méridional. *Cahiers de géographie du Québec*, 12: 25-47.
- JASINSKI, J.P.P. et S. PAYETTE, 2005. The creation of alternative stable states in the southern boreal forest, Québec, Canada. *Ecological Monographs*, 75: 561-583.
- JOHNSON, E.A., 1992. Fire and vegetation dynamics: studies from the North American boreal forest. Cambridge University Press, Cambridge, 129 p.
- LAVOIE, L. et L. SIROIS, 1998. Vegetation changes caused by recent fires in the northern boreal forest of eastern Canada. *Journal of Vegetation Science*, 9: 483-492.
- LE GOFF, H., M.D. FLANNIGAN, Y. BERGERON et M.P. GIRARDIN, 2007. Historical fire regime shifts related to climate teleconnections in the Waswanipi area, central Quebec, Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 16: 607-618.
- LOGAN, T., I. CHARRON, D. CHAUMONT et D. HOULE, 2011. Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Ouranos et ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec, 55 p. Disponible en ligne à : <https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/1.-Atlas-climatique-for%C3%A4t.pdf>.
- MORIN, H. et D. LAPRISE, 1990. Histoire récente des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette au nord du lac Saint-Jean, Québec : une analyse dendrochronologique. *Canadian Journal of Forest Research*, 20: 1-8.
- [MRN] MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, 1999. Base de données topographiques du Québec (BDTQ) à l'échelle de 1/20 000, Normes de production, version 1.0. Direction de la cartographie topographique, Québec, 322 p.
- [MRNF] MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE, 2009. Normes de cartographie écoforestière, Troisième inventaire écoforestier. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction des inventaires forestiers, Québec, 95 p. Disponible en ligne à : <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/norme-cartographie-ecoforestiere.pdf>.
- OKSANEN, J., F.G. BLANCHET, M. FRIENDLY, R. KINDT, P. LEGENDRE, D. MCGINN, P.R. MINCHIN, R.B. O'HARA, G.L. SIMPSON, P. SOLYMOS, M.H.H. STEVENS, E. SZOECIS et H. WAGNER, 2017. Vegan: Community Ecology Package. R package version 2.4-5.
- PAUSAS, J.G. et E. RIBEIRO, 2017. Fire and plant diversity at the global scale. *Global Ecology and Biogeography*, 26: 889-897.
- PAYETTE, S., 1992. Fire as a controlling process in the North American boreal forest. Dans : SHUGART, H.H., R. LEEMANS et G.B. BONAN (éd.). A systems analysis of the global boreal forest. Cambridge University Press, Cambridge, p. 144-165.
- PAYETTE, S. et A. DELWAIDE, 2003. Shift of conifer boreal forest to lichen-heath parkland caused by successive stand disturbances. *Ecosystems*, 6: 540-550.
- PAYETTE, S. et A. DELWAIDE, 2018. Tamm review: The North-American lichen woodland. *Forest Ecology and Management*, 417: 167-183.
- PAYETTE, S., C. MORNEAU, L. SIROIS et M. DESPONTS, 1989. Recent fire history of the northern Québec biomes. *Ecology*, 70: 656-673.
- PAYETTE, S., N. BHIRY, A. DELWAIDE et M. SIMARD, 2000. Origin of the lichen woodland at its southern range limit in eastern Canada: the catastrophic impact of insect defoliators and fire on the spruce-moss forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 30: 288-305.
- POLLOCK, S.L. et S. PAYETTE, 2010. Stability in the patterns of long-term development and growth of the Canadian spruce-moss forest. *Journal of Biogeography*, 37: 1684-1697.
- PROULX, H., G. JACQUES, A. M. LAMOTHE et J. LITYNSKI, 1987. Climatologie du Québec méridional. Rapport n° 65, ministère de l'Environnement du Québec, Direction de la météorologie, Québec, 131 p.

- R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011. R: A language and environment for statistical computing. Software, R Foundation for Statistical Computing. Vienne, Autriche. Disponible en ligne à : <http://www.R-project.org/>.
- ROBITAILLE, A., D. ROBERT, J.-P. SAUCIER et F. CHÉNARD, 1994. Cartographie des districts écologiques; normes et techniques. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction de la gestion des stocks forestiers, Québec, 109 p. Disponible en ligne à : <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/carto-district-ecol-normes-et-tech-4.pdf>.
- SAUCIER, J.-P., A. ROBITAILLE, P. GRONDIN, J.-F. BERGERON et J. GOSSELIN, 2011. Les régions écologiques du Québec méridional (4^e version). Carte à l'échelle de 1/1 250 000. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. Disponible en ligne à : <https://mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/carte-regions-ecologiques.pdf>.
- SKINNER, W.R., M.D. FLANNIGAN, B.J. STOCKS, D.M. MARTELL, B.M. WOTTON, J.B. TODD, J.A. MASON, K.A. LOGAN et E.M. BOSCH, 2001. A 500 mb synoptic wildland fire climatology from large Canadian forest fires, 1959–1996. *Theoretical and Applied Climatology*, 71 : 157-169.
- STOCKS, B.J., J.A. MASON, J.B. TODD, E.M. BOSCH, B.M. WOTTON, B.D. AMIRO, M.D. FLANNIGAN, K.G. HIRSH, K.A. LOGAN, D.L. MARTELL et W.R. SKINNER, 2003. Large forest fires in Canada, 1959-1997. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D1) : 8149.
- VEILLEUX-NOLIN, M. et S. PAYETTE, 2012. Influence of recent fire season and severity on black spruce regeneration in spruce-moss forests of Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 42 : 1316-1327.
- VERAVERBEKE, S., B.M. ROGERS, M.L. GOULDEN, R.R. JANDT, C.E. MILLER, E.B. WIGGINS et J.T. RANDERSON, 2017. Lightning as a major driver of recent large fires years in North American boreal forests. *Nature Climate Change*, 7 : 529-534.
- WARD, C., D. POTHIER et D. PARÉ, 2014. Do boreal forests need fire disturbance to maintain productivity? *Ecosystems*, 17 : 1053-1067.
- WEIR, J.M.H., E.A. JOHNSON et K. MIYANISHI, 2000. Fire frequency and the spatial age mosaic of the mixed-wood boreal forest in the western Canada. *Ecological Applications*, 10 : 1162-1177.
- WESTERLING, A.L., T.J. BROWN, A. GERSHUNOV, D.R. CAYAN et M.D. DETTINGER, 2003. Climate and wildfire in the Western United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84 : 595-604.





Yvan Bedard
PHOTONATURE
Ph.D. Prof. émérite
Neuveville, Qc
Canada G0A 2R0
1-418-561-7046

yvan_bedard@hotmail.com
PHOTOS-LICENCES-COURS-CONSEILS
<http://yvanbedardphotonature.com>



**Aubé
Anctil
Pichette
& Associés**

Comptables agréés | Société en nom collectif

5300, boul. des Galeries, bur. 200, Québec QC G2K 2A2
Tél.: 418 622-4804 | Téléc.: 418 622-2681