

Enjeux contemporains en forêt tempérée au Québec – Partie 1 : Portrait du territoire forestier

par Louis Duchesne,¹ François Guillemette,¹ Steve Bédard¹ et Rock Ouimet¹

RÉSUMÉ

Nous proposons une série d'articles qui présentent les principaux enjeux pour la forêt tempérée du Québec face aux changements environnementaux et socio-économiques multiples et rapides. Ce premier article brosse un portrait sommaire de la forêt québécoise afin d'établir les fondements de la réflexion présentée dans les articles suivants. Les compilations révèlent que la forêt dominée par les essences feuillues typiques de la zone tempérée nordique représente 8,8 % du territoire forestier de la province, et que ces essences se trouvent aussi en mélange avec des essences résineuses sur 4,9 % du territoire. Les perturbations que subissent ces forêts sont plus souvent partielles que sévères. Les essences les plus abondantes incluent les essences feuillues tolérantes à l'ombre comme l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh., 152,4 Mm³), l'érable rouge (*Acer rubrum* L., 141,5 Mm³), le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt., 135,6 Mm³) et le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh., 27,5 Mm³). L'analyse de leur démographie révèle chez les trois premières un léger déclin au cours des dernières décennies; en revanche, le hêtre à grandes feuilles tend à proliférer. Par ailleurs, l'abondance de l'érable à sucre et du hêtre à grandes feuilles devrait augmenter à la limite nord de leur aire de répartition, possiblement en raison des changements climatiques. La maladie corticale du hêtre pourrait toutefois freiner la progression du hêtre à grandes feuilles au Québec.

Mots clés: forêt mixte, forêt décidue, carte forestière, état de la forêt, perturbations forestières

ABSTRACT

We propose a series of papers presenting the main issues for Québec's temperate forest arising from the multiplicity of rapid environmental and socioeconomic changes. This first paper presents a brief profile of Québec's forests to establish a basis for the reflections presented in the remaining papers. Compilations show that the area dominated by deciduous species typical of the northern temperate zone accounts for 8.8% of the province's total forest, and that these species are also found mixed with coniferous species on 4.9% of the territory. The disturbances affecting these forests are generally more partial than severe. The most abundant species include shade-tolerant hardwoods such as sugar maple (*Acer saccharum* Marsh., 152.4 Mm³), red maple (*Acer rubrum* L., 141.5 Mm³), yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britt., 135.6 Mm³) and American beech (*Fagus grandifolia* Ehrh., 27.5 Mm³). A demographic analysis shows that populations of the first three species have declined slightly in recent decades, whereas the American beech has tended to proliferate. Sugar maple and American beech are likely to become more abundant toward the northern boundary of their range, possibly due to climate change. However, beech bark disease may hinder the progression of the American beech in Québec.

Keywords: deciduous forest, mixed forest, forest map, forest condition, forest disturbances



Louis Duchesne



François Guillemette



Steve Bédard



Rock Ouimet

¹ Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec, 2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8, Canada

* Auteur de correspondance: francois.guillemette@mrfn.gouv.qc.ca

Introduction

Les forêts sont actuellement soumises à des changements multiples et rapides : les changements climatiques et leurs effets sur les principaux agents de perturbations abiotiques (incendies, sécheresses, vent, neige et glace) et biotiques (insectes et agents pathogènes); les invasions biologiques, notamment celles découlant du commerce mondial; l'augmentation de la pollution atmosphérique par les oxydes de soufre et d'azote, les composés organiques volatils, le monoxyde de carbone et les particules fines, entre autres; les variations populationnelles de certains herbivores forestiers; l'intensification de l'exploitation forestière et de la lutte contre les feux et les insectes ravageurs; ainsi que les changements dans l'affectation des terres. Tous ces changements peuvent avoir des répercussions importantes sur l'état et le fonctionnement des écosystèmes forestiers (Trumbore *et al.* 2015; Seidl *et al.* 2017; Janowiak *et al.* 2018; Danneyrolles *et al.* 2019; Reed *et al.* 2021; Coughlin *et al.* 2023; Williams *et al.* 2023; Cui *et al.* 2024).

Les effets déjà causés par ces changements sur la gestion durable des forêts, de même que ceux à venir, imposent d'élaborer des stratégies d'adaptation. Considérant le manque de connaissances et l'incertitude quant au devenir des forêts dans cet environnement changeant, cela représente un réel défi, qui concerne les aspects non seulement écologiques, mais aussi sociaux, politiques et économiques (Himes *et al.* 2023).

Pour aider les aménagistes dans un tel contexte, nous proposons une série d'articles qui présentent les enjeux qui nous apparaissent importants pour la forêt tempérée du Québec. Nous ciblons celle-ci, car elle présente une dynamique et un régime de perturbation distincts de la forêt boréale. Bien que notre analyse se limite à la forêt québécoise en raison du type de tenure et des sources de données forestières propres à la province, elle est pertinente aussi pour les forêts du même type situées dans les autres provinces canadiennes et les États du nord-est des États-Unis (Fig. 1).

Ce premier article brosse un portrait sommaire de la composition, de la structure d'âge et du régime de perturbation de la forêt québécoise. L'objectif principal est d'établir les fondements de la réflexion présentée dans les autres articles. Les articles suivants s'attardent aux enjeux qui soulèvent les changements environnementaux contemporains (invasions biologiques, changements climatiques et pollution atmosphérique) et les changements socio-économiques pour l'aménagement et la gestion des territoires forestiers. Un dernier article passe en revue les principaux enjeux de sylviculture et des effets documentés des traitements sylvicoles pour la forêt tempérée du Québec, ce qui permet de dresser les potentiels et les limites de l'action sylvicole.

Lorsqu'on considère cette série dans son ensemble, nous pensons que les diverses parties intéressées y trouveront des éléments essentiels pour comprendre les enjeux contemporains découlant des changements globaux dans ce type de forêts et pour élaborer des stratégies d'adaptation visant à assurer une gestion durable de ces écosystèmes forestiers.

Méthodologie

Afin d'établir les fondements de la réflexion quant aux enjeux que soulèvent les changements globaux contemporains pour la forêt tempérée du Québec, nous avons produit des portraits sommaires de la composition, de la structure d'âge et de l'empreinte des perturbations pour la forêt aménagée de la province, à partir de la carte écoforestière et des résultats

d'inventaire réalisés par le ministère des Ressources naturelles et des Forêts. De plus, nous avons analysé l'évolution contemporaine du couvert forestier ainsi que la démographie des principales essences feuillues de la zone tempérée nordique. Ce portrait est complémentaire à ceux réalisés pour la forêt publique sous aménagement du Québec (MRNF 2009b) et pour la forêt décidue et mixte à feuillus durs au Québec (Boulet 2015; Boulet et Pin 2015).

La carte écoforestière constitue la base d'information pour la gestion forestière au Québec (MRNF 2009a; MFFP 2015; MFFP 2020a). Au cours des 50 dernières années, l'ensemble du territoire a été analysé environ tous les dix ans à partir de photographies en noir et blanc ou infrarouges (échelle : ~ 1:15 000). Des polygones présentant des caractéristiques communes concernant les attributs forestiers (composition, densité, âge, hauteur), le matériel parental du sol, le drainage, la pente du terrain, les perturbations historiques et le type écologique sont délimités et caractérisés. Les plans d'eau, les terres agricoles, les terres improductives, les routes et autres zones non forestières sont également délimités. L'interprétation photographique suit des protocoles standardisés et est vérifiée à l'aide d'un réseau de points de contrôle que les photo-interprètes visitent pour valider les informations. Les caractéristiques des peuplements telles que la densité des tiges, la surface terrière et le volume de bois par essence sont estimées pour chaque polygone de la carte écoforestière à partir de compilations des données d'inventaires forestiers réalisés chaque décennie. Ces inventaires consistent en un sondage terrestre de la forêt au moyen de dizaines de milliers de placettes-échantillons circulaires d'une superficie de 400 m² (MFFP 2016a; MFFP 2022a, 2022b), tandis que les méthodes de compilations ont évolué au cours du temps (MFFP 2017).

Composition, structure d'âge et taille des arbres

Nous avons compilé la superficie du territoire de la forêt aménagée à partir de la carte écoforestière originale de l'inventaire forestier du Québec méridional (version téléchargée le 8 mars 2022, MFFP 2022c). Cette carte est produite presque en totalité par photo-interprétation du territoire à partir de photographies aériennes datant de 2002 à 2017. À partir de l'information sur le type de couvert forestier (feuillus [F], mixte [M] et résineux [R]) et le groupement d'essences des peuplements, nous avons catégorisé chaque polygone de la carte écoforestière selon 7 sous-types de couvert (Tableau 1) : couvert feuillu dominé par les feuillus tolérants (F-FT), couvert feuillu dominé par les feuillus intolérants (F-FI), couvert feuillu dominé par les feuillus non commerciaux (F-FN), couvert mixte dominé par les feuillus tolérants (M-FT), couvert mixte dominé par les feuillus intolérants (M-FI), couvert mixte dominé par les résineux (M-R) et finalement, couvert résineux (R).

La liste des 46 essences commerciales exploitables répertoriées au Québec est présentée au tableau 2, avec leurs noms commun et scientifique, de même que leur code d'essence à 3 caractères, la catégorie utilisée dans cet article pour chacune et la zone forestière à laquelle elles sont typiquement associées. Les feuillus intolérants à l'ombre (FI) incluent le bouleau à papier, le bouleau gris et les peupliers, soit principalement des essences typiques de la zone boréale. Les feuillus tolérants à l'ombre (FT) incluent notamment l'érable à sucre, l'érable rouge, le bouleau jaune, le hêtre à grandes feuilles, le chêne rouge et le tilleul d'Amérique. Même si ces feuillus typiques de la zone tempérée nordique ne sont pas tous tolérants à l'ombre, ils ont

été regroupés sous cette appellation dans le cadre des inventaires forestiers au Québec (MRNF 2009a; MFFP 2015, 2020a). Malgré cette confusion entourant la notion de tolérance à l'ombre de certaines essences, nous avons utilisé les termes FT et FI pour désigner ces groupes d'essences feuillues dans nos compilations, à l'instar de la pratique actuelle. La plupart des essences résineuses (R) sont typiques de la zone boréale, mais certaines, comme le pin blanc ou la pruche du Canada, sont plus typiques de la zone tempérée nordique que de la zone

boreale. Nous avons aussi comptabilisé la superficie des terrains forestiers productifs dont le type de couvert est indéterminé (REGEN, hauteur < 7 m), tout comme la superficie des terrains forestiers improductifs (TFI : aulnaies et terrains dénudés) et des terrains forestiers à vocation non forestière (TFVN).

Nous avons aussi compilé la structure d'âge des peuplements pour ces sous-types de couvert à partir de la carte écoforestière. La classe d'âge définit à la fois la structure du peuplement et l'âge des tiges qui le composent (MFFP 2015). La structure du

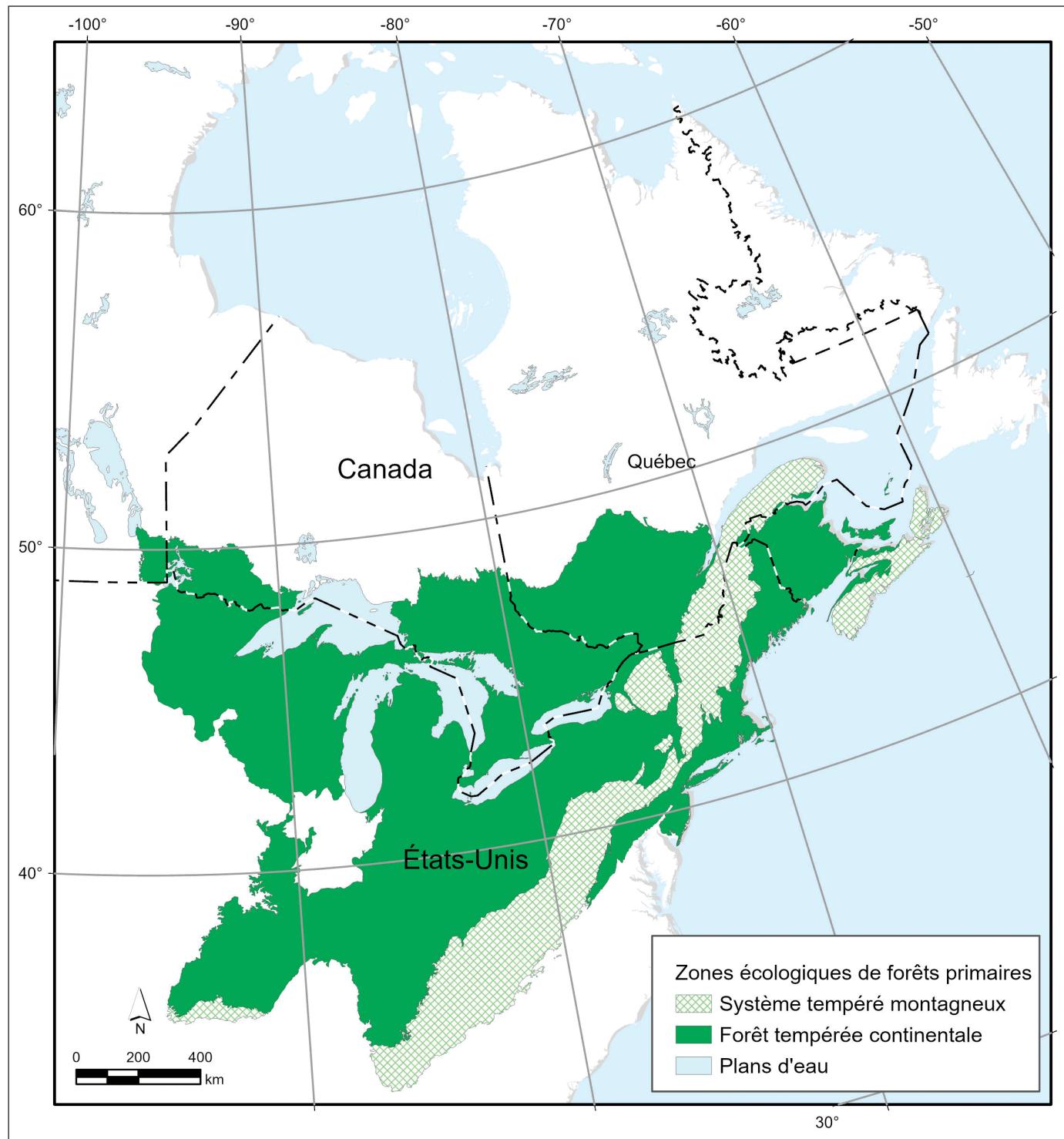


Fig. 1. Les zones écologiques de la forêt tempérée continentale et du système tempéré montagneux en Amérique du Nord, telles que définies par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture [FAO 2022]. Données numériques vectorielles [1:10,000,000].

peuplement est dite régulière (équienne) si les tiges qui le composent sont dans la même classe d'âge, et irrégulière ou étagée (inéquienne) si les tiges qui le composent sont dans des classes d'âge différentes. Nous avons considéré seulement la classe d'âge de l'étage supérieur des peuplements étagés. La classe d'âge est généralement indéterminée (IND) pour les peuplements de 0 à 2 m de hauteur. À partir de cette information, nous avons établi les classes-synthèses d'âge suivantes : 10 = 0-20 ans; 30 = 21-40 ans; 50 = 41-60 ans; 70 = 61-80 ans; 90 = 81-100 ans; 120 = 101 ans et plus; JI = jeune peuplement inéquienne ou de structure irrégulière (origine ≤ 80 ans); VI = vieux peuplement inéquienne ou de structure irrégulière (origine > 80 ans).

Nous avons compilé le volume marchand brut total (en Mm³) pour la province et le volume marchand brut moyen par tige (en dm³.tige⁻¹), par essence et par sous-type de couvert, à partir des résultats d'inventaires associés à cette même carte écoforestière originale (MFFP 2022c). Ce volet du portrait repose donc en partie sur la méthodologie des compilations par peuplement réalisées à partir de l'inventaire forestier du Québec méridional (MFFP 2017). Cet inventaire forestier consiste en un sondage terrestre de la forêt au moyen d'environ 100 000 placettes-échantillons circulaires d'une superficie de 400 m² (MFFP 2022b).

Pour tracer un portrait plus détaillé des peuplements composés d'une proportion importante d'essences feuillues de la zone tempérée, nous avons subdivisé les sous-types de couvert F-FT et M-FT en 15 groupements-synthèses d'essences selon la proportion d'érable à sucre (ERS), de bouleau jaune (BOJ), des autres essences FT, des essences FI, et finalement, des essences feuillues non commerciales (FN) que le photo-interprète a détectées dans le peuplement. Nous avons créé un groupe additionnel pour les plantations de FT ou de R envahies par un autre groupe d'essences et qui se classaient ensuite dans le sous-type de couvert M-FT.

Régimes de perturbation

Nous avons aussi comptabilisé la proportion des terrains forestiers productifs selon la perturbation naturelle ou l'intervention

humaine et le sous-type de couvert à partir de la carte écoforestière originale. Cette approche ne permet pas de tenir compte des perturbations d'une superficie inférieure à l'aire minimale de cartographie, ni des perturbations historiques non répertoriées et indétectables lors de la photo-interprétation. Une perturbation naturelle ou une intervention humaine est qualifiée « d'origine » si elle a éliminé plus de 75 % de la surface terrière du peuplement, et de « partielle » si elle en a éliminé de 25 à 75 %. Ainsi, selon la terminologie d'Oliver et Larson (1996), la perturbation ou l'intervention d'origine est considérée comme majeure, car elle mène au remplacement du peuplement, tandis que la perturbation partielle est considérée comme mineure, car elle laisse sur pied une bonne partie des arbres. Notons que les fréquentes perturbations de faible gravité, comme celles causées par la mort d'un arbre sur pied (p. ex., Seymour *et al.* 2002), ne sont pas relevées dans cette cartographie.

Dans les cas des perturbations et des interventions d'origine, nous avons regroupé tous les types de coupes sous l'appellation coupe totale. Nous avons ajouté les rarissimes polygones dont l'origine a été associée au verglas à ceux d'origine indéterminée. Les autres perturbations d'origine sont le brûlis, la plantation, l'épidémie sévère, le chablis total, la friche agricole et le dépérissement total.

Dans le cas des perturbations et des interventions partielles, nous avons regroupé tous les types de coupe sous l'appellation coupe partielle, et les travaux de plantation, d'enrichissement et de regarni, sous l'appellation enrichissement. Les autres perturbations ou interventions partielles sont l'épidémie légère, l'éclaircie précommerciale, le chablis partiel, le dépérissement partiel, le brûlis partiel et le verglas partiel.

Évolution contemporaine du couvert forestier

Nous avons caractérisé l'évolution contemporaine des superficies selon le type de couvert à partir des données du système d'information forestière par tesselle (SIFORT; MFFP 2022d). SIFORT s'appuie sur un échantillonnage systématique des cartes écoforestières historiques sur la base de polygones de 15 secondes de latitude par 15 secondes de longitude, dont la superficie moyenne est d'environ 14 hectares. L'information

Tableau 1. Catégorisation du territoire selon le sous-type de couvert, le groupement d'essence et la catégorie de terrain.

Sous-type de couvert	Définition
Feuillu à dominance de feuillus tolérants (F-FT)	Les feuillus constituent plus de 75 % de la surface terrière du peuplement, et plus de 50 % de la portion feuillue est constituée de feuillus tolérants.
Feuillu à dominance de feuillus intolérants (F-FI)	Les feuillus constituent plus de 75 % de la surface terrière du peuplement, et plus de 50 % de la portion feuillue est constituée de feuillus intolérants.
Feuillu à dominance de feuillus non commerciaux (F-FN)	Les feuillus constituent plus de 75 % de la surface terrière du peuplement, et plus de 50 % de la portion feuillue est constituée de feuillus non commerciaux.
Mixte à dominance de feuillus tolérants (M-FT)	Les résineux constituent de 25 % à 50 % de la surface terrière du peuplement, et plus de 50 % de la portion feuillue est constituée de feuillus tolérants.
Mixte à dominance de feuillus intolérants (M-FI)	Les résineux constituent de 25 % à 50 % de la surface terrière du peuplement, et plus de 50 % de la portion feuillue est constituée de feuillus intolérants.
Mixte à dominance résineuse (M-R)	Les résineux constituent de 50 % à 75 % de la surface terrière du peuplement.
Résineux (R)	Les résineux constituent plus de 75 % de la surface terrière du peuplement.
Régénération (REGEN)	Peuplement de moins de 7 m de hauteur dont le groupement d'essences est indéterminé.
Terrain forestier improductif	Dénudé sec, dénudé humide ou aulnaie.
Terrain à vocation non forestière	Terrain non forestier (zone urbaine ou consacrée à des activités industrielles, minières, agricoles, touristiques ou de villégiature, etc.).

Tableau 2. Liste des essences d'arbre commercialement exploitables répertoriées au Québec

Catégorie*	Essence	Nom latin	Code†	Zone écologique‡
Feuillus intolérants	Bouleau à papier	<i>Betula papyrifera</i>	BOP	Boréale
	Bouleau gris	<i>Betula populifolia</i>	BOG	Boréale
	Peuplier à feuilles deltoïdes	<i>Populus deltoides</i>	PED	Tempérée
	Peuplier à grandes dents	<i>Populus grandidentata</i>	PEG	Tempérée
	Peuplier baumier	<i>Populus balsamifera</i>	PEB	Boréale
	Peuplier faux-tremble	<i>Populus tremuloides</i>	PET	Boréale
	Peupliers hybrides	<i>Populus sp.</i>	PEH	S. O.
Feuillus tolérants	Bouleau jaune	<i>Betula alleghaniensis</i>	BOJ	Tempérée
	Caryer cordiforme	<i>Carya cordiformis</i>	CAC	Tempérée
	Caryer ovale	<i>Carya ovata</i>	CAF	Tempérée
	Cerisier tardif	<i>Prunus serotina</i>	CET	Tempérée
	Chêne à gros fruits	<i>Quercus macrocarpa</i>	CHG	Tempérée
	Chêne bicolore	<i>Quercus bicolor</i>	CHE	Tempérée
	Chêne blanc	<i>Quercus alba</i>	CHB	Tempérée
	Chêne rouge	<i>Quercus rubra</i>	CHR	Tempérée
	Érable à sucre	<i>Acer saccharum</i>	ERS	Tempérée
	Érable argenté	<i>Acer saccharinum</i>	ERA	Tempérée
	Érable noir	<i>Acer nigrum</i>	ERN	Tempérée
	Érable rouge	<i>Acer rubrum</i>	ERR	Tempérée
	Frêne d'Amérique	<i>Fraxinus americana</i>	FRA	Tempérée
	Frêne de Pennsylvanie	<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	FRP	Tempérée
	Frêne noir	<i>Fraxinus nigra</i>	FRN	Tempérée
	Hêtre à grandes feuilles	<i>Fagus grandifolia</i>	HEG	Tempérée
Résineux	Noyer cendré	<i>Juglans cinerea</i>	NOC	Tempérée
	Orme d'Amérique	<i>Ulmus americana</i>	ORA	Tempérée
	Orme de Thomas	<i>Ulmus thomasii</i>	ORT	Tempérée
	Orme rouge	<i>Ulmus rubra</i>	ORR	Tempérée
	Ostryer de Virginie	<i>Ostrya virginiana</i>	OSV	Tempérée
	Tilleul d'Amérique	<i>Tilia americana</i>	TIL	Tempérée
	Épinette blanche	<i>Picea glauca</i>	EPB	Boréale
	Épinette de Norvège	<i>Picea abies</i>	EPO	S. O.
	Épinette noire	<i>Picea mariana</i>	EPN	Boréale
	Épinette rouge	<i>Picea rubens</i>	EPR	Tempérée
	Mélèze européen	<i>Larix decidua</i>	MEU	S. O.
	Mélèze hybride	<i>Larix sp.</i>	MEH	S. O.
	Mélèze japonais	<i>Larix leptolepis</i>	MEJ	S. O.
	Mélèze laricin	<i>Larix laricina</i>	MEL	Boréale

* Catégorie des essences utilisée dans le cadre des inventaires forestiers au Québec.

† Code utilisé pour désigner les essences dans le cadre des inventaires forestiers au Québec.

‡ Zone écologique de répartition de l'essence (tempérée ou boréale pour les essences indigènes, et sans objet [S. O.] pour les essences exotiques).

attribuée à chaque polygone (tesselle) ainsi créé correspond aux données des cartes écoforestières historiques (type de couvert, groupement d'essences, classe d'âge, etc.) qui se trouvent au centroïde de la tesselle. À partir de cette base de données, nous avons caractérisé l'évolution des superficies selon le type de couvert, de la première carte écoforestière (élaborée à partir des photos aériennes prises de 1950 à 1978), à la quatrième carte écoforestière (élaborée à partir des photos prises de 2000 à 2015). Le type de couvert est le critère de base de la stratification forestière et, contrairement aux groupements d'essences, sa classification est demeurée inchangée depuis le premier inventaire (Pelletier *et al.* 2007). Nous avons aussi comptabilisé l'évolution de la superficie des terrains forestiers improductifs et des terrains à vocation non forestière.

Démographie des principales essences feuillues tempérées

Nous avons dressé un portrait démographique des quatre principales essences FT (érable à sucre, érable rouge, bouleau jaune et hêtre) pour chaque sous-domaine bioclimatique du système de classification écologique du Québec (MFFP 2020b). Pour ce faire, nous avons compilé les distributions diamétrales représentant le nombre moyen de tiges vivantes à l'hectare pour chaque classe de diamètre de 2 cm, à partir des données des placettes-échantillons temporaires du deuxième (1981-1994) et du quatrième (2001-2018) inventaire écoforestier du Québec méridional (MFFP 2022a, 2022b). En raison de divergences méthodologiques, le premier inventaire forestier (1970-1983) réalisé au Québec n'est pas diffusé. Ces bases de données incluent les mesures réalisées dans près de 100 000 placettes-échantillons à chaque campagne de mesures, pour un total de plus de 215 000 placettes compilées dans les deux campagnes analysées. Nous avons compilé les données sur les

gaules (tiges avec un diamètre de 2 à 8 cm, mesuré à une hauteur de 1,3 m, inventoriées dans une sous-placette de 40 m²) et sur les tiges marchandes (tiges avec un diamètre à hauteur de poitrine [mesuré à une hauteur de 1,3 m] ≥ 9,1 cm, inventoriées dans une placette de 400 m²).

Pour chaque essence, nous avons calculé le nombre moyen de tiges à l'hectare par classe de diamètre, pour chaque sous-domaine du système de classification écologique du Québec, en considérant exclusivement l'unité de paysage régional de ce même système comme strate d'échantillonnage (Fig. 2). Une telle stratification à postériori se rapproche de celle d'un plan d'échantillonnage stratifié (MFFP 2016a). Nous avons réalisé cette compilation dans l'environnement R (R Core Team 2024) à l'aide du progiciel *survey*, version 4.0 (Lumley 2004), en considérant la superficie de l'unité de paysage régionale comme facteur de correction pour la population finie. Pour chaque classe de diamètre et chaque essence non répertoriée dans une placette-échantillon donnée, nous avons considéré que la valeur était nulle dans les compilations. À titre indicatif, une unité de paysage régional est un territoire qui est relativement homogène sur le plan du relief, de l'altitude, de la géomorphologie, de l'hydrographie et de la végétation (MFFP 2021). Le Québec en compte 364, d'une superficie moyenne d'environ 4 000 km².

Depuis longtemps, l'analyse du nombre d'arbres dans des classes de diamètre successives de largeurs égales, pour une population d'arbres, a été identifiée comme un moyen de décrire l'état et la dynamique d'une population (De Liocourt 1898, 1900; Picard et Gasparotto 2016). La loi de Liocourt stipule en effet que pour une population, le nombre d'arbres dans des classes de diamètre successives de même largeur forme une série géométrique décroissante, avec un rapport à peu près

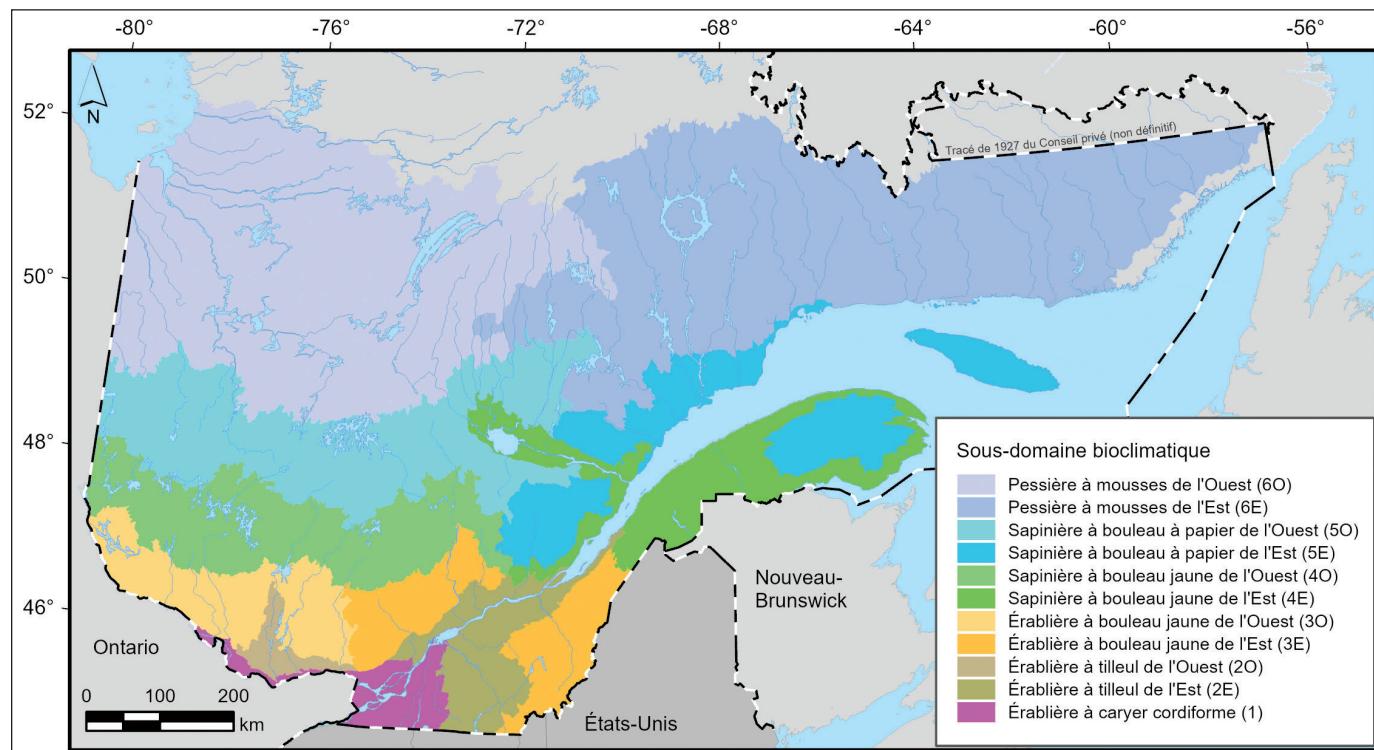


Fig. 2. Sous-domaines bioclimatiques définis selon le système de classification écologique du Québec. Les domaines sont définis d'après le type de végétation de fin de succession dominant sur les sites mésiques, alors que les subdivisions en sous-domaines de l'Ouest et de l'Est sont basées sur des différences dans les régimes des précipitations et des perturbations naturelles qui se traduisent par des différences appréciables dans le couvert végétal (MFFP, 2021). Les domaines 1 à 4 font partie de la zone de végétation tempérée nordique, alors que les domaines 5 et 6 font partie de la zone boréale.

constant entre les classes successives. Les populations dites « durables » (c'est-à-dire équilibrées) sont donc celles qui parviennent à stabiliser cette géométrie en équilibrant le recrutement, la croissance et la mortalité (Manion et Griffin 2001; Rubin *et al.* 2006; Cale *et al.* 2014). Sur un graphique, la transformation logarithmique du nombre d'arbres par classe de diamètre forme alors une droite (Leak 2002). Lorsque la relation forme un plateau au milieu de la courbe, celle-ci est alors qualifiée de sigmoïde pivotée (*rotated sigmoid*, Leak 2002). D'abord développée pour l'analyse à grande échelle des sapinières en France, ce concept d'équilibre de la loi de Liocourt a été utilisé par plusieurs pour étudier la stabilité des populations d'arbres à diverses échelles spatiales, allant du paysage au sous-continent (Manion et Griffin 2001; Garnas *et al.* 2011).

Manipulation des données et production des figures

Nous avons réalisé la plupart des analyses dans l'environnement R (R Core Team 2024), en utilisant notamment les progiciels *dplyr* pour la manipulation des données (Wickham *et al.* 2023), *sf* pour la manipulation des données vectorielles (Pebesma 2018; Pebesma et Bivand 2023), *raster* pour la manipulation des données spatiales rastérissées (Hijmans 2023), ainsi que *ggplot2* et *cowplot* pour la production des figures (Wickham 2016; Wilke 2024). Les cartes ont été produites à l'aide du logiciel QGIS (version 3.4).

Résultats et discussion

Peuplements forestiers

Le Québec se trouve à la transition entre la zone de végétation tempérée nordique et la zone boréale (Fig. 2). Les FT dominent donc le paysage dans le sud de la province (Fig. 3), où ces essences se situent à la limite nord de leur aire de répartition; plus au nord, elles laissent progressivement la place aux FI et aux R, mieux adaptés aux températures froides de la zone boréale. Les R dominent dans la zone boréale, mais sont néanmoins aussi très abondants au sud de la province, dans la zone tempérée nordique. Quelques peuplements isolés à dominance de FT sont aussi observés dans la portion nord de la zone boréale. Cette mosaïque forestière est donc largement influencée par le gradient de température qui caractérise le Québec méridional, mais aussi par les caractéristiques de stations et l'historique des perturbations qui influencent la répartition contemporaine des essences à l'échelle régionale.

A l'échelle de la province, les types de couvert F, M et R représentent 15,3 %, 25,1 % et 50,0 % de la superficie des terrains forestiers productifs, respectivement, alors que 9,6 % du territoire forestier productif est en régénération (Tableau 3). Parmi les couverts de type F, le sous-type F-FT représente 8,8 % de la superficie forestière provinciale, alors que le sous-type F-FI occupe 5,9 % de cette superficie.

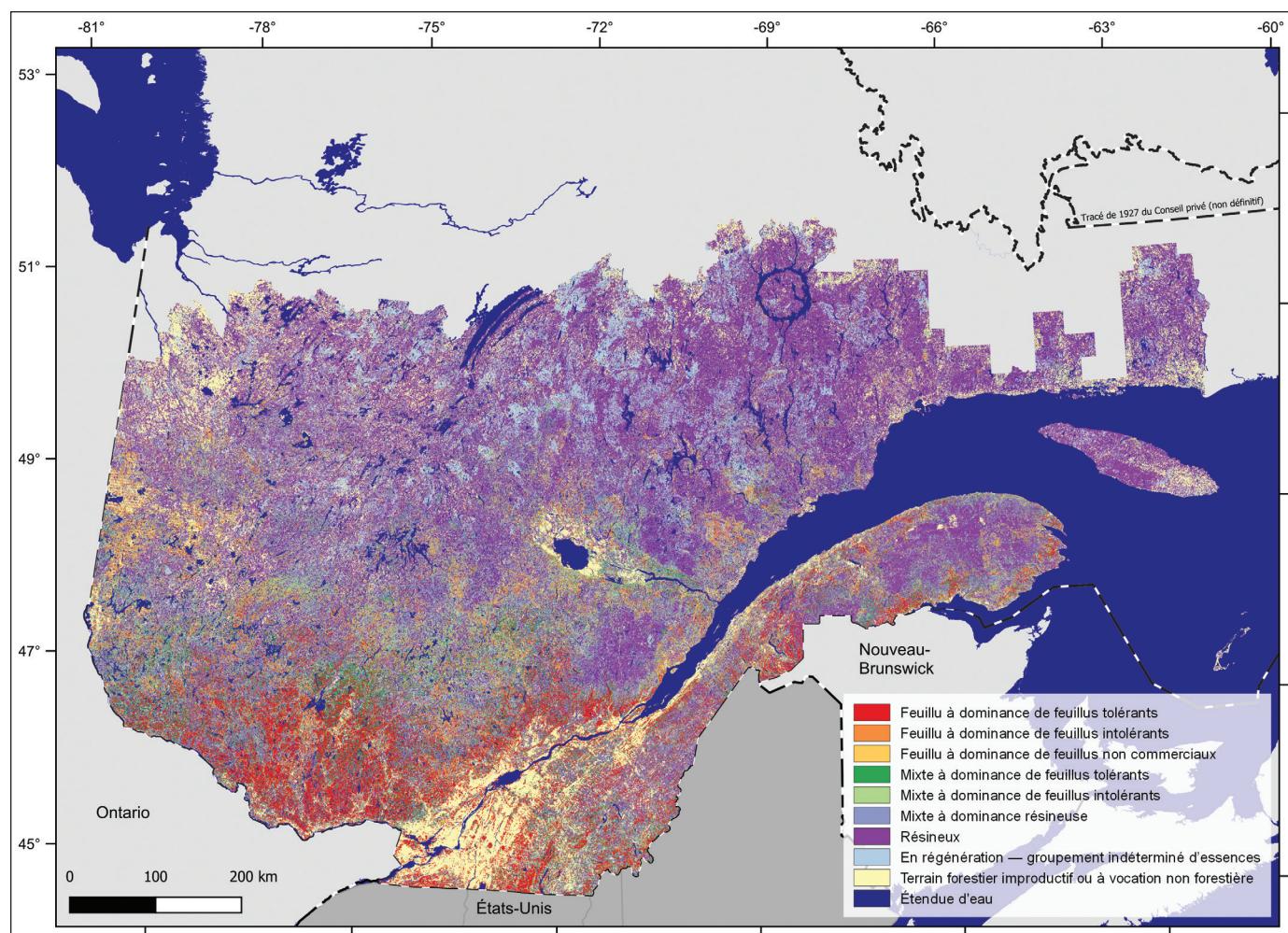


Fig. 3. Superficies contemporaines occupées au Québec par sous-type de couvert ou catégorie de terrain. Source des données : Carte écoforestière originale du Québec.

Le sous-type de couvert F-FT est majoritairement composé d'érablières à érable à sucre (54,2 %), de bétulaies à bouleau jaune (11,6 %) et de peuplements à dominance d'autres essences FT (Tableau 4). Ces deux essences se trouvent aussi en abondance dans le sous-type M-FT qui occupe 4,9 % de la superficie des terrains forestiers productifs (Tableau 3). Dans celui-ci, 9,4 % sont des peuplements mixtes dominés par l'érable à sucre, 33,2 % par le bouleau jaune, et 57,4 % par d'autres FT (Tableau 5).

Parmi les 10 groupements-synthèses d'essences à dominance d'éralbe à sucre ($23\,012 \text{ km}^2$), les érablières dites « pures » en érable à sucre (c'est-à-dire avec moins de 25 % d'autres essences), sont nettement minoritaires, représentant 17 % de ce groupe, ou $3\,900 \text{ km}^2$ (Tableaux 4 et 5). De plus, cette proportion, même faible, pourrait avoir été accentuée par les perturbations anthropiques des XIX^e et XX^e siècles (p. ex. : Brisson et Bouchard 2003). À cette époque, plusieurs essences compagnes de l'éralbe étaient ciblées par la récolte (p. ex. : le

Tableau 3. Superficie contemporaine du territoire de la forêt du Québec méridional selon le sous-type de couvert et la catégorie de terrain

Catégorie de terrain	Sous-type de couvert*	Superficie	
		$\times 000 \text{ km}^2$	%
Terrains forestiers productifs	Feuillu à dominance de feuillus tolérants (F-FT)	38,6	8,8
	Feuillu à dominance de feuillus intolérants (F-FI)	26,0	5,9
	Feuillu à dominance de feuillus non commerciaux (F-FN)	2,6	0,6
	Mixte à dominance de feuillus tolérants (M-FT)	21,6	4,9
	Mixte à dominance de feuillus intolérants (M-FI)	35,5	8,1
	Mixte à dominance résineuse (M-R)	53,1	12,1
	Résineux (R)	219,5	50,0
	En régénération — groupement indéterminé (REGEN)	42,3	9,6
Total		439,2	100,0
Terrains forestiers improductifs		55,3	—
Terrains à vocation non forestière		32,4	—

* Source des données : Carte écoforestière originale. La composition est donc déterminée par photo-interprétation. Les feuillus intolérants à l'ombre (FI) incluent le bouleau à papier, le bouleau gris ainsi que les peupliers; les feuillus tolérants à l'ombre (FT) incluent entre autres l'érable à sucre, l'érable rouge, le bouleau jaune, le hêtre à grandes feuilles, le chêne rouge et le tilleul d'Amérique.

Tableau 4. Superficie contemporaine occupée par le sous-type de couvert feuillu à dominance de feuillus tolérants (F-FT), selon le groupement synthèse d'essences. Les feuillus constituent plus de 75 % de la surface terrière de ces peuplements, et plus de 50 % de la portion feuillue est constituée de feuillus tolérants. La composition est regroupée selon la proportion (plus de 50 % ou plus de 25 %) que constituent les essences ou le groupe d'essences de la portion feuillue du peuplement.

Groupement synthèse d'essences	Proportion		Superficie	
	>50 %	>25 %	$\times 000 \text{ km}^2$	%
Érablière à érable à sucre	ERS	ERS	3,9	10,0
Érablière à érable à sucre avec bouleau jaune	ERS	BOJ	5,1	13,3
Érablière à érable à sucre avec feuillu tolérant	ERS	FT	10,2	26,3
Érablière à érable à sucre avec feuillu intolérant	ERS	FI	1,8	4,6
Érablière à érable à sucre avec feuillus non commerciaux	ERS	FN	0,01	0,03
Bétulaie à bouleau jaune	BOJ	BOJ	0,9	2,4
Bétulaie à bouleau jaune avec érable à sucre	BOJ	ERS	1,8	4,6
Bétulaie à bouleau jaune avec feuillus tolérants	BOJ	FT	1,0	2,7
Bétulaie à bouleau jaune avec feuillus intolérants	BOJ	FI	0,7	1,9
Bétulaie à bouleau jaune avec feuillus non commerciaux	BOJ	FN	0,002	0,005
Feuillu tolérants	FT	FT	5,9	15,2
Feuillu tolérants avec érable à sucre	FT	ERS	1,8	4,8
Feuillu tolérants avec bouleau jaune	FT	BOJ	1,1	2,8
Feuillu tolérants avec feuillu intolérants	FT	FI	3,3	8,5
Feuillu tolérants avec feuillu non commerciaux	FT	FN	1,1	2,9
Total — couvert feuillu à dominance de feuillus tolérants			38,6	100,0

Note : ERS = érable à sucre; BOJ = bouleau jaune; FT = feuillu tolérants à l'ombre excluant l'érable à sucre et le bouleau jaune; FI = feuillu intolérants à l'ombre (bouleau à papier, bouleau gris et peupliers); FN = feuillu non commerciaux. La combinaison d'érables (code ER) est comprise avec l'érable à sucre (code ERS), et l'érable rouge (code EO) de même que les feuillu indéterminés (Code FX) sont compris parmi les feuillu tolérants.

Tableau 5. Superficie contemporaine occupée par le sous-type de couvert mixte à dominance de feuillus tolérants (M-FT) selon le groupe-ment synthèse d'essences. Les résineux constituent de 25 % à 50 % de la surface terrière du peuplement et plus de 50 % de la portion feuillue est constituée de feuillus tolérants. La composition est regroupée selon la proportion (>50 % ou >25 %) que constituent les essences ou le groupe d'essences de la portion feuillue du peuplement.

Groupement synthèse d'essences	Proportion		Superficie	
	>50 %	>25 %	× 000 km ²	%
Érablière à érable à sucre et à résineux	ERS	ERS	0,1	0,3
Érablière à érable à sucre avec bouleau jaune et résineux	ERS	BOJ	0,8	3,9
Érablière à érable à sucre avec feuillus tolérants et résineux	ERS	FT	0,6	2,9
Érablière à érable à sucre avec feuillus intolérants et résineux	ERS	FI	0,5	2,4
Érablière à érable à sucre avec feuillus non commerciaux et résineux	ERS	FN	0,002	0,01
Bétulaie à bouleau jaune et résineux	BOJ	BOJ	1,7	7,8
Bétulaie à bouleau jaune avec érable à sucre et résineux	BOJ	ERS	1,4	6,6
Bétulaie à bouleau jaune avec feuillus tolérants et résineux	BOJ	FT	1,9	9,0
Bétulaie à bouleau jaune avec feuillus intolérants et résineux	BOJ	FI	2,1	9,8
Bétulaie à bouleau jaune avec feuillus non commerciaux et résineux	BOJ	FN	0,003	0,01
Feuillus tolérants et résineux	FT	FT	5,0	23,2
Feuillus tolérants avec érable à sucre et résineux	FT	ERS	0,3	1,4
Feuillus tolérants avec bouleau jaune et résineux	FT	BOJ	1,1	5,1
Feuillus tolérants avec feuillus intolérants et résineux	FT	FI	3,6	16,8
Feuillus tolérants avec feuillus non commerciaux et résineux	FT	FN	1,5	6,8
Plantation de feuillus tolérants ou de résineux envahie	FT	R	0,9	4,1
Total — couvert mixte à dominance de feuillus tolérants			21,6	100,0

Note : ERS = érable à sucre; BOJ = bouleau jaune; FT = feuillus tolérants à l'ombre excluant l'érable à sucre et le bouleau jaune; FI = feuillus intolérants à l'ombre (bouleau à papier, bouleau gris et peupliers); FN = feuillus non commerciaux; R = résineux. La combinaison d'érables (code ER) est considérée parmi l'érable à sucre (code ES) et l'érable rouge (code EO) est considéré parmi les feuillus tolérants. Les feuillus indéterminés (code FX) sont aussi considérés parmi les feuillus tolérants.

pin blanc et les chênes pour la construction navale, la pruche pour les tanneries), tandis qu'il y avait un intérêt à maintenir sur pied des érables à sucre pour la production de sirop d'érable en forêt privée. Il y avait également peu d'intérêt pour la transformation de l'éryable à sucre en bois d'œuvre avant les années 1960 (Boulet 2015).

Abondance des essences et taille des arbres

Les 20 essences les plus abondantes représentent 99 % du volume marchand brut dans la province, évalué à 3 257,7 Mm³ (Tableau 6). Parmi celles-ci, les 7 essences R les plus abondantes représentent près de 70 % du volume marchand brut total, toutes essences confondues, alors que chacun des groupes composés de 7 FT et des 4 FI les plus abondants représente approximativement 15 % (Tableau 6). Dans l'ordre, les 9 essences les plus abondantes sont l'épinette noire (986 Mm³), le sapin baumier (723 Mm³), le bouleau à papier (246 Mm³), le peuplier faux-tremble (212 Mm³), l'épinette blanche (199 Mm³), l'éryable à sucre (153 Mm³), l'éryable rouge (142 Mm³), le bouleau jaune (136 Mm³) et le pin gris (120 Mm³); elles représentent 90 % du volume marchand brut total. Le hêtre à grandes feuilles (27,5 Mm³), le chêne rouge (20,5 Mm³), le frêne noir (8,8 Mm³) et le tilleul d'Amérique (8,2 Mm³) sont les 4 autres FT qui se classent parmi les essences les plus abondantes, mais elles le sont nettement moins que les érables et le bouleau jaune. Le pin blanc, jadis un symbole important de l'exploitation forestière dans l'est du Canada (p. ex. : Thompson *et al.* 2006), représente maintenant 49,7 Mm³, soit près de la moitié moins que le thuja

(91,1 Mm³), mais quand même plus que l'épinette rouge (35,0 Mm³), le mélèze laricin (22,6 Mm³) ou la pruche (18,2 Mm³).

Ce portait des volumes marchands bruts par essence ne considère pas les différences parfois importantes entre les essences quant aux volumes perdus par la carie ou par leur non-utilisation, comme certaines branches marchandes. En effet, le volume net des essences R typiques de la zone boréale est généralement de 4 à 6 % moindre que le volume marchand brut, tandis que celui des essences FT typiques de la zone tempérée nordique est d'environ 20 à 30 % moindre (BMMB, 2022). Le rang du pin gris dans le portrait des volumes (9^e, avec 120 Mm³) se situerait probablement juste avant celui de l'éryable à sucre (6^e, avec 153 Mm³) si nous avions calculé les volumes nets plutôt que bruts.

L'éryable à sucre domine le volume dans le sous-type de couvert F-FT, alors que le bouleau jaune et l'éryable rouge dominent la portion feuillue du sous-type M-FT (Tableau 6). Le volume de ces deux essences diminue graduellement dans les sous-types M-R, M-FI, puis R. À l'inverse, le volume des essences R augmente dans ces sous-types de couvert. Près de 13 % du volume total se trouve dans le sous-type de couvert F-FT, même si celui-ci occupe moins de 9 % de la superficie forestière.

Les arbres de toutes les essences ont un volume marchand brut moyen par tige de 1 à 2,5 fois plus grand dans le sous-type de couvert F-FT que dans le sous-type R (Tableau 7). Pour la grande majorité des essences, le volume marchand brut moyen par tige décroît progressivement de la zone tempérée nordique

Tableau 6. Volume marchand brut total [Mm³] contemporain des 20 essences les plus abondantes sur les terrains forestiers productifs au Québec méridional, selon le sous-type de couvert.

Essence	Volume marchand brut total, selon le sous-type de couvert* (Mm ³)								
	F-FT	F-FI	F-NC	M-FT	M-FI	M-R	R	REGEN	Total
ERS	128,5	6,1	0,025	10,0	2,3	4,1	1,5	0,016	152,5
ERR	55,9	14,2	0,107	24,7	14,4	22,5	9,6	0,021	141,5
BOJ	60,8	8,7	0,062	31,3	11,5	17,6	5,5	0,005	135,6
HEG	22,7	0,8	0,008	2,2	0,2	1,2	0,3	0,005	27,5
CHR	14,3	1,0	0,001	2,3	0,4	1,9	0,6	0,013	20,5
FRN	2,9	1,2	0,006	1,5	1,0	1,6	0,6	0,002	8,8
TIL	6,4	0,6	0,001	0,6	0,2	0,4	0,1	0,003	8,2
Total FT	291,4	32,6	0,210	72,6	30,0	49,3	18,4	0,065	494,6
BOP	17,5	52,4	0,108	13,4	62,4	52,3	47,8	0,010	245,9
PET	14,1	71,0	0,116	6,4	53,2	32,9	34,6	0,013	212,3
PEG	6,2	6,0	0,011	1,5	2,3	2,1	0,9	0,006	19,1
PEB	0,8	2,1	0,009	0,5	1,8	2,4	2,4	0,001	10,0
Total FI	38,6	131,5	0,245	21,8	119,7	89,7	85,8	0,030	487,4
EPN	1,0	14,9	0,118	1,9	31,4	64,8	871,8	0,013	986,0
SAB	32,0	38,3	0,297	33,6	74,4	139,7	404,6	0,017	722,9
EPB	10,8	13,6	0,081	10,0	24,7	39,0	100,5	0,008	198,6
PIG	0,2	3,0	0,029	0,3	6,9	11,0	98,7	0,004	120,2
THO	5,9	3,0	0,027	8,2	6,3	22,4	45,3	0,010	91,1
PIB	6,1	2,5	0,008	5,7	4,0	17,0	14,3	0,039	49,7
EPR	3,9	0,9	0,020	4,3	2,3	10,3	13,3	0,003	35,0
MEL	0,7	0,3	0,015	0,6	1,0	2,8	17,2	0,004	22,6
PRU	7,2	0,5	0,006	4,5	0,5	4,1	1,4	0,013	18,2
Total R	67,8	77,0	0,601	69,2	151,6	311,2	1567,0	0,110	2244,5
Autres	11,4	2,4	0,039	2,8	1,3	3,7	9,5	0,012	31,2
Total général	409,3	243,6	1,095	166,4	302,6	453,8	1680,7	0,217	3 257,7

* Sous-types de couvert : F-FT = feuillu à dominance de feuillus tolérants; F-FI = feuillu à dominance de feuillus intolérants; F-NC = feuillu à dominance de feuillus non commerciaux; M-FT = mixte à dominance de feuillus tolérants; M-FI = mixte à dominance de feuillus intolérants; M-R = mixte à dominance de résineux; R = résineux; REGEN = en régénération — groupement indéterminé d'essences.

au sud à la zone boréale au nord. Dans l'ordre, le volume marchand brut moyen par tige décroît progressivement dans les sous-types de couvert F-FT (315 dm³), M-FT, M-R, M-FI, F-FI et R (153 dm³). Dans l'ordre, le pin blanc (939 dm³), le peuplier à grandes dents (536 dm³), le chêne rouge (457 dm³), le tilleul d'Amérique (430 dm³) et la pruche du Canada (371 dm³) sont les essences qui forment les plus gros arbres. Bien que ces essences ne comptent pas les plus grands volumes marchands bruts totaux (Tableau 6), elles ont toutes la capacité de produire des arbres de grande dimension (Burns et Honkala 1990). Leurs grands volumes moyens par tiges reflètent peut-être une surreprésentation des tiges de fort diamètre dans la distribution diamétrale en raison des difficultés de recrutement d'arbres plus petits dans la population. En effet, la raréfaction du pin blanc, du chêne rouge et de la pruche du Canada, notamment en raison de la surexploitation historique, de la lutte contre les feux, de la surpopulation de cerf de Virginie ou de la présence de nouveaux ravageurs, est déjà bien documentée (MFFP

2016b). Le peuplier à grandes dents est très intolérant à l'ombre, et la prévalence des coupes partielles parmi les perturbations dominantes de la zone tempérée nordique peut restreindre son recrutement. Quant au tilleul d'Amérique, il se régénère peu par ensemencement, mais se maintient surtout par rejets de souche après coupe (Crow 1990). La difficulté à régénérer le bouleau jaune pourrait aussi en partie expliquer pourquoi le volume moyen des tiges de cette essence (281 dm³) est plus grand que celui des 3 autres essences dominantes de la zone tempérée nordique, soit l'érythrina à sucre (233 dm³), l'érythrina rouge (128 dm³) et le hêtre à grandes feuilles (222 dm³). Le sapin baumier (85 dm³), l'épinette noire (103 dm³) et le bouleau à papier (109 dm³) sont les essences avec les plus petits arbres en moyenne. Cet effet est notamment attribuable à leur caractère plus boréal et au fait qu'elles poussent donc souvent là où le climat rigoureux devient contraignant à la croissance des arbres. La taille en moyenne plus petite du sapin baumier, comparativement à l'épinette noire, est fort probablement due à

Tableau 7. Volume marchand brut moyen par tige ($\text{dm}^3 \cdot \text{tige}^{-1}$) contemporain des 20 essences les plus abondantes sur les terrains forestiers productifs au Québec méridional, selon le sous-type de couvert. Les valeurs en gras correspondent aux groupements contenant un volume d'au moins 1 Mm^3 .

Essence	Volume marchand brut moyen par tige, selon le sous-type de couvert* ($\text{dm}^3 \cdot \text{tige}^{-1}$)								
	F-FT	F-FI	F-NC	M-FT	M-FI	M-R	R	REGEN	Moyenne
ERS	306	171	168	246	183	199	193	235	233
ERR	214	105	83	166	101	116	89	129	128
BOJ	332	263	180	321	269	276	233	265	281
HEG	229	140	173	257	170	226	253	172	222
CHR	592	316	296	449	277	302	234	281	457
FRN	224	130	76	145	127	117	87	91	150
TIL	500	285	180	372	288	428	259	233	430
Moyenne FT	312	178	137	247	178	196	154	202	223
BOP	217	124	84	168	113	110	84	163	109
PET	521	333	167	462	315	288	236	359	298
PEG	636	444	279	608	561	543	331	421	536
PEB	326	293	175	265	281	246	244	309	265
Moyenne FI	409	264	147	344	246	228	156	309	223
EPN	131	120	67	153	124	120	93	114	103
SAB	101	92	78	107	90	92	78	72	85
EPB	274	238	166	313	265	259	199	192	233
PIG	327	327	134	308	312	271	159	335	199
THO	315	190	167	280	219	215	202	284	234
PIB	1 149	821	693	1 168	929	994	761	641	939
EPR	239	172	150	223	201	203	177	116	202
MEL	346	172	146	320	204	224	159	214	176
PRU	425	269	267	308	238	343	394	288	371
Moyenne R	323	217	154	319	235	249	149	252	200
Autres	206	253	145	200	228	249	222	223	221
Moyenne générale	315	221	148	286	225	232	153	242	211

* Sous-types de couvert : F-FT = feuillu à dominance de feuillus tolérants; F-FI = feuillu à dominance de feuillus intolérants; F-NC = feuillu à dominance de feuillus non commerciaux; M-FT = mixte à dominance de feuillus tolérants; M-FI = mixte à dominance de feuillus intolérants; M-R = mixte à dominance de résineux; R = résineux; REGEN = en régénération — groupement indéterminé d'essences.

l'âge des peuplements, étant donné que les sapinières ont été fortement perturbées par la dernière épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (Duchesne et Ouimet 2008). En moyenne, la taille des arbres des essences FT, FI et R est très similaire (de 200 à 223 dm^3) et très près de celle de tous les arbres, évaluée à 211 dm^3 .

Régimes de perturbation

À l'échelle du Québec, une perturbation ou une intervention d'origine est déterminée pour environ le tiers (36,1 %) de la superficie des terrains forestiers productifs (Tableau 8). Pour ces peuplements d'origine connue, elles sont majoritairement issues d'intervention humaine (23,4 %), soit de coupe totale (18,2 %), de plantation (4,6 %) ou de friche (0,6 %). Le reste (12,6 %) étant issu de perturbations naturelles, qui comprennent le brûlis total (10,4 %), l'épidémie sévère (1,5 %), le chablis total (0,7 %) et, en beaucoup plus faible proportion, le dépérissement total (0,03 %). Notons que les importants

incendies de forêt survenus en 2023 (qui ont touché 13 000 km^2 , soit près de 2 % de la forêt du Québec) ne sont pas comptabilisés dans ce portrait. Ils étaient toutefois concentrés dans la zone boréale de l'Ouest (BFEC 2023). Le sous-type de couvert F-FT est caractérisé par une plus grande proportion de peuplements d'origine indéterminée (87,5 %) comparativement aux sous-types F-FI, M, et R, pour lesquels 28,3 % à 37,1 % de la superficie proviennent d'une perturbation sévère (Tableau 8).

Les observations précédentes reflètent un gradient latitudinal du régime de perturbations : les perturbations sévères ont une empreinte plus marquée dans la zone boréale que dans la zone tempérée nordique (Fig. 4). De plus, chacune de ces perturbations couvre généralement une superficie bien plus grande. Dans une étude plus approfondie des régimes de feux au Québec, Couillard *et al.* (2022) ont aussi rapporté ces tendances : les brûlis les plus grands et les plus fréquents sont observés dans la portion ouest de la zone boréale, tandis que les brûlis les plus petits et les moins fréquents sont observés dans

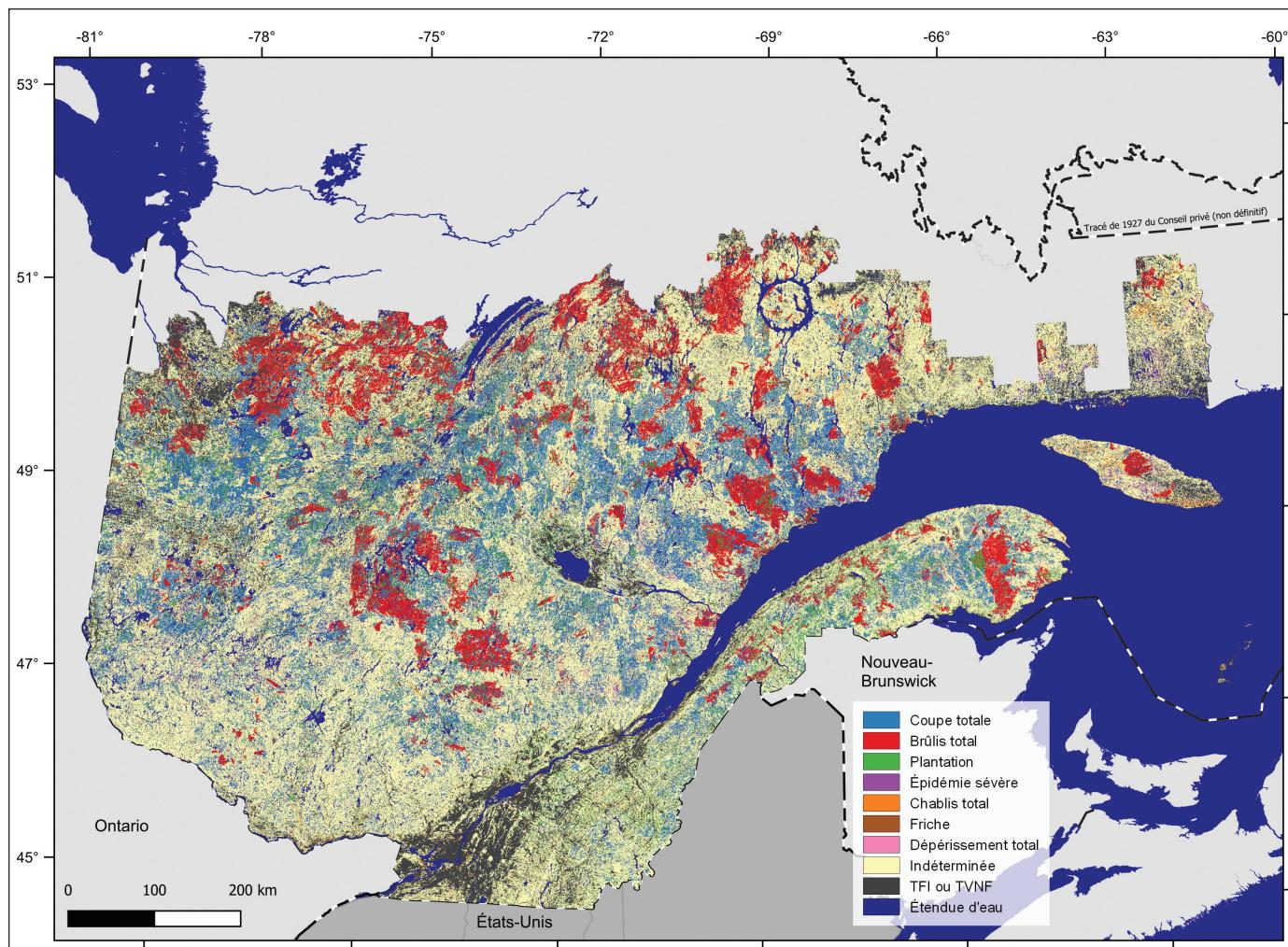


Fig. 4. Empreinte contemporaine des perturbations et des interventions d'origine historiques sur le Québec méridional. Note : les importants feux de forêt survenus en 2023 (13 000 km²) ne sont pas montrés; ils étaient surtout situés dans le quadrant nord-ouest du Québec méridional. Source des données : Carte écoforestière originale. TFI = terrains forestiers improductifs; TVNF = terrains à vocation non forestière.

Tableau 8. Proportion contemporaine des terrains forestiers productifs du Québec méridional selon la perturbation ou l'intervention d'origine, par sous-type de couvert.

Sous-type de couvert	Superficie (× 000 km²)	Perturbation ou intervention d'origine (%)*							
		CT	P	FR	BR	CHT	ES	DT	IND
Feuillu à dominance de feuillus tolérants (F-FT)	38,6	9,5	0,2	0,6	2,0	0,1	0,2	<0,1	87,5
Feuillu à dominance de feuillus intolérants (F-FI)	26,0	15,1	0,2	0,1	18,1	0,1	0,4	<0,1	65,9
Feuillu à dominance de feuillus non commerciaux (F-FN)	2,6	59,1	3,6	17,3	6,4	1,5	7,9	0,3	4,0
Mixte à dominance de feuillus tolérants (M-FT)	21,6	18,6	4,5	0,7	2,4	0,3	2,0	<0,1	71,5
Mixte à dominance de feuillus intolérants (M-FI)	35,5	14,1	1,4	<0,1	10,9	0,2	1,7	<0,1	71,7
Mixte à dominance résineuse (M-R)	53,1	20,1	5,5	0,2	7,5	0,5	3,3	<0,1	62,9
Résineux (R)	219,5	12,5	6,3	<0,1	8,8	0,4	1,1	<0,1	70,8
En régénération — groupement indéterminé d'essences (REGEN)	42,3	56,5	4,0	4,1	29,6	3,8	1,9	0,1	<0,1
Total des terrains forestiers productifs	-	18,2	4,6	0,6	10,4	0,7	1,5	0,03	63,9

* Source des données : Carte écoforestière originale. Tous les types de coupes d'origine sont regroupés sous l'appellation coupe totale (CT). Les perturbations naturelles et les interventions humaines d'origine (y compris les plantations et les regarnis, regroupés sous l'abréviation [P]) sont définies comme des événements qui éliminent plus de 75 % de la surface terrière d'un peuplement ou qui ont permis la mise en place du peuplement actuel (p. ex., plantation). FR = friche; BR = brûlis total; CHT = chablis total; ES = épидémie sévère; DT = dépérissement total; IND = perturbation ou intervention d'origine indéterminée. Seules les perturbations les plus récentes pour chaque polygone écoforestier sont considérées.

la zone tempérée nordique, surtout dans sa portion est. Ces auteurs ont évalué que le cycle de feu durait de 540 à 840 ans dans la majorité de la zone tempérée nordique au Québec. Toutefois, ils l'ont évalué à près de 300 ans dans l'extrême ouest de cette zone au Québec, soit dans la portion plus chaude et plus sèche, laquelle contient davantage de pins et de chênes rouges, des essences mieux adaptées aux feux. Drever *et al.* (2006) avaient précédemment estimé à près de 500 ans le cycle des grands feux (superficie > 200 ha) dans le Témiscamingue, une partie de cet extrême ouest du Québec. Le cycle était plus court (230 ans) dans les stations forestières à pin blanc, et plus long (920 ans) dans les stations à érable à sucre. Les forêts dominées par les FT du nord-est de l'Amérique du Nord subissent habituellement peu de perturbations majeures ou de forte gravité, comme un feu ou un chablis total couvrant plusieurs hectares (p. ex. : Frelich et Lorimer 1991; Seymour *et al.* 2002). En conséquence, les conditions naturelles dans ces forêts sont rarement propices à la régénération des essences intolérantes à l'ombre.

Le sous-type de couvert F-FN, bien que peu abondant, origine majoritairement d'une coupe totale (59,1 %) ou d'une friche (17,3 %, Tableau 8). Les peuplements en régénération, dont le groupement d'essences est indéterminé, ont aussi majoritairement pour origine une intervention humaine (64,6 %, y compris la coupe totale [56,5 %], la friche [4,1 %] et la plantation [4,0 %]). Lorsque l'origine est plutôt d'une perturbation naturelle (35,4 %), alors c'est surtout le brûlis total (29,6 %), sinon le chablis total (3,8 %), l'épidémie sévère (1,9 %) ou le dépérissement total (0,1 %).

En plus des perturbations et des interventions d'origine, les forêts sont aussi marquées par les perturbations et les interventions partielles. À l'échelle du Québec, la perturbation ou l'intervention partielle est déterminée dans environ un cinquième (20,6 %) de la superficie des terrains forestiers productifs (Tableau 9). Ces peuplements, dont la perturbation ou l'intervention partielle est connue, ont majoritairement été perturbés par les interventions humaines (11,2 %), y compris la

coupe partielle (7,3 %), l'éclaircie précommerciale (3,7 %) et la plantation d'enrichissement (0,2 %). Le reste (9,4 %) est issu de perturbations naturelles, soit l'épidémie légère (5,2 %), le chablis partiel (3,1 %), le dépérissement partiel (0,7 %) ou le brûlis partiel (0,4 %).

L'empreinte des perturbations et des interventions partielles est plus marquée chez les sous-types F-FT et M-FT, dont près du tiers de la superficie (31,5 à 37,6 %) aurait été partiellement perturbé au cours des dernières décennies (Tableau 9). Dans ce cas, la coupe partielle est de loin la principale perturbation (23,4 à 34,9 %) qu'ont subie ces peuplements. L'épidémie légère vient au deuxième rang (1,7 à 5,8 %), et est d'ailleurs aussi la principale perturbation partielle observée dans les sous-types M-FI et M-R (8,9 à 11,7 %), avant la coupe partielle (7,9 à 8,2 %). Quant aux peuplements de type R, ils ont été principalement perturbés par le chablis partiel (5,6 %) et l'épidémie légère (4,8 %), avec une proportion similaire (5,6 %) traitée par éclaircie précommerciale. La tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* (Clemens)) est de loin le principal insecte défoliateur des essences R au Québec, alors que la livrée des forêts (*Malacosoma disstria* Hübner) est le principal insecte défoliateur des essences FT et FI (MRNF 2023). Étant donné que le sous-type de couvert F-FN et les peuplements en régénération ont en grande partie pour origine une perturbation sévère, la trace d'une perturbation partielle pour ces superficies est minime. Dans ce cas, l'éclaircie précommerciale est la principale intervention partielle appliquée à ces peuplements (1,6 % à 1,8 %).

L'importance du type de perturbation partielle selon le type de couvert se traduit par un gradient latitudinal du régime de perturbations, avec une empreinte plus marquée des perturbations partielles dans la zone de la forêt tempérée nordique comparativement à la zone boréale (Fig. 5). La coupe partielle prévaut dans la zone tempérée au sud de la province, l'épidémie légère prédomine dans la transition entre les zones tempérée et boréale, l'éclaircie précommerciale a majoritairement été appliquée dans la portion sud de la zone boréale, alors que le chablis partiel est plus abondant au nord de la zone boréale (Fig. 5).

Tableau 9. Proportion contemporaine des terrains forestiers productifs du Québec méridional selon la perturbation ou l'intervention partielle, pour chaque sous-type de couvert.

Sous-type de couvert	Perturbation ou intervention partielle (%)*								
	CP	EPC	ENR	EL	CHP	DP	BRP	VEP	IND
Feuillu à dominance de feuillus tolérants (F-FT)	34,9	0,6	0,2	1,7	0,2	0,1	<0,1	0,1	62,4
Feuillu à dominance de feuillus intolérants (F-FI)	10,0	1,7	0,1	5,1	1,1	1,4	0,1	0,1	80,5
Feuillu à dominance de feuillus non commerciaux (F-FN)	0,2	1,8	0,3	0,0	<0,1	<0,0	<0,1	<0,1	97,6
Mixte à dominance de feuillus tolérants (M-FT)	23,4	1,5	0,4	5,8	0,2	0,1	<0,1	0,1	68,5
Mixte à dominance de feuillus intolérants (M-FI)	8,2	1,2	<0,1	11,7	1,3	1,0	0,1	<0,1	76,4
Mixte à dominance résineuse (M-R)	7,9	3,3	0,2	8,9	1,3	0,6	0,2	<0,1	77,8
Résineux (R)	1,7	5,6	0,2	4,8	5,6	0,9	0,8	<0,1	80,5
En régénération — groupement indéterminé d'essences (REGEN)	0,1	1,6	1,0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	97,3
Total des terrains forestiers productifs	7,3	3,7	0,2	5,2	3,1	0,7	0,4	<0,1	79,4

* Source des données : Carte écoforestière originale. Tous les types de coupes partielles sont regroupés sous l'appellation coupe partielle (CP). La perturbation ou l'intervention partielle regroupe les phénomènes naturels et les coupes qui ont éliminé de 25 à 75 % de la surface terrière du peuplement. Elles incluent aussi les opérations sylvicoles qui visent à améliorer la structure du peuplement comme l'éclaircie précommerciale (EPC) et les traitements de régénération artificielle comme l'enrichissement (ENR). EL = épidémie légère; CHP = chablis partiel; DP = dépérissement partiel; BRP = brûlis partiel; VEP = verglas partiel; IND = perturbation ou intervention partielle indéterminée. Seules les perturbations les plus récentes pour chaque polygone écoforestier sont considérées.

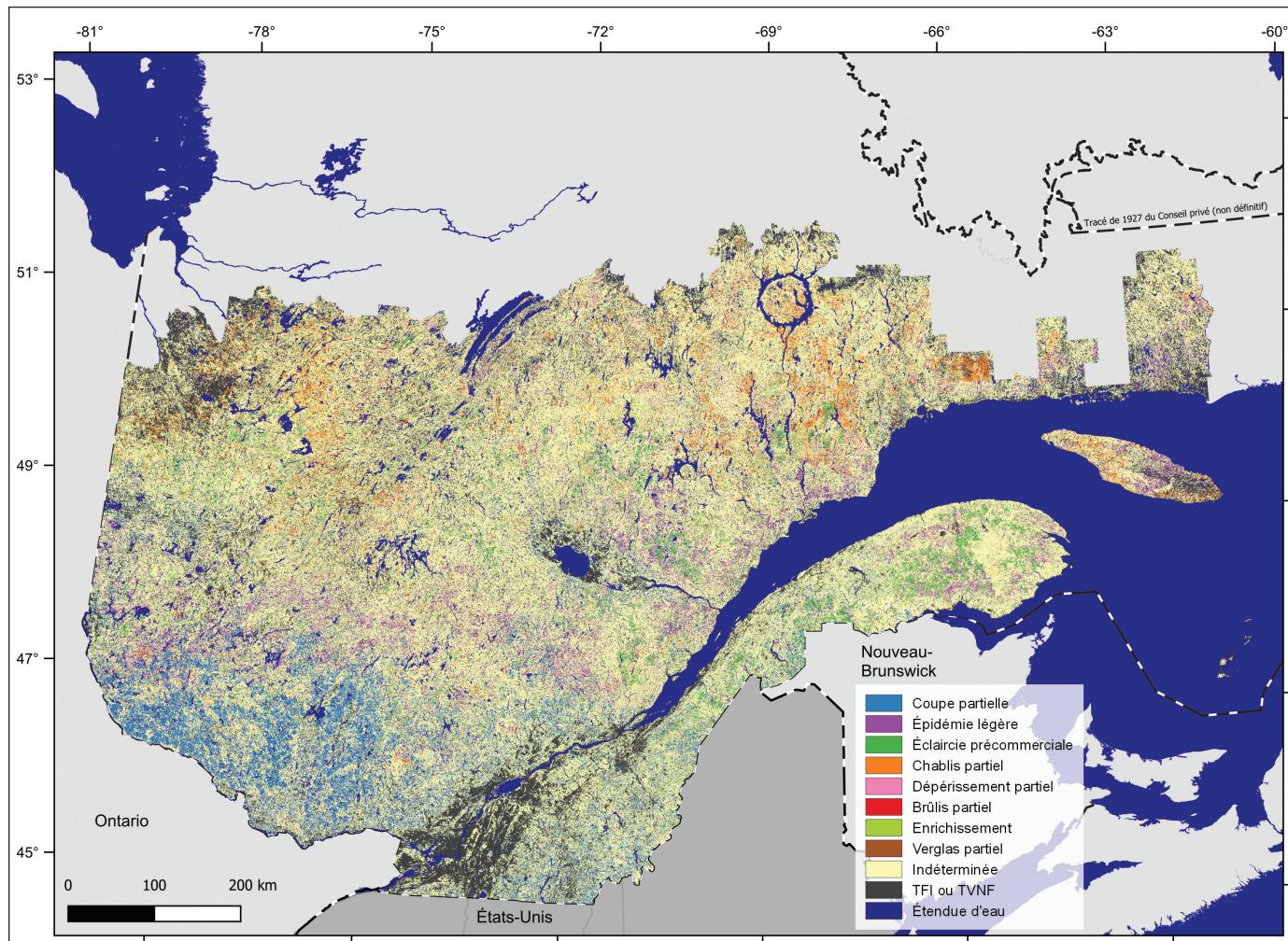


Fig. 5. Empreinte contemporaine des perturbations et des interventions partielles historiques sur le Québec méridional. Source des données : Carte écoforestière originale. TFI = terrains forestiers improductifs; TVNF = terrains à vocation non forestière.

Tableau 10. Proportion contemporaine des terrains forestiers productifs du Québec méridional selon la classe synthèse d'âge pour chaque sous-type de couvert.

Sous-type de couvert	Proportion par classe synthèse d'âge (%)*								
	10	30	50	70	90	120	JI	VI	IND
Feuillu à dominance de feuillus tolérants (F-FT)	8,5	5,3	3,7	1,4	1,5	0,1	30,3	49,1	<0,1
Feuillu à dominance de feuillus intolérants (F-FI)	7,6	19,6	20,7	25,5	13,0	0,9	8,2	4,5	<0,1
Feuillu à dominance de feuillus non commerciaux (F-FN)	79,7	18,8	0,4	0,1	<0,1	<0,1	0,9	0,1	<0,1
Mixte à dominance de feuillus tolérants (M-FT)	21,6	7,5	4,4	2,1	0,9	0,1	24,7	38,7	<0,1
Mixte à dominance de feuillus intolérants (M-FI)	4,1	20,8	19,2	19,6	8,2	1,3	17,2	9,6	<0,1
Mixte à dominance résineuse (M-R)	12,6	22,7	13,8	10,1	5,0	2,2	18,9	14,8	<0,1
Résineux (R)	6,1	15,4	9,8	12,8	9,5	24,0	4,5	17,8	0,3
En régénération — groupement indéterminé d'essences (REGEN)	23,3	5,5	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	70,8
Total des terrains forestiers productifs	9,9	14,8	9,9	10,9	6,9	12,4	10,3	17,9	7,0

* Source des données : Carte écoforestière originale. Seule la classe d'âge de l'étage supérieur des peuplements étagés a été considérée. La classe d'âge est généralement indéterminée (IND) pour les peuplements de 0 à 2 m de hauteur. 10 = 0-20 ans; 30 = 21-40 ans; 50 = 41-60 ans; 70 = 61-80 ans; 90 = 81-100 ans; 120 = 101 ans et plus; JI = jeune peuplement inéquienne ou de structure irrégulière (origine ≤ 80 ans); VI = vieux peuplement inéquienne ou de structure irrégulière (origine > 80 ans).

Bien que les exploitants aient préconisé historiquement la coupe à partir d'un diamètre limite (Boulet 2015; Boulet et Pin 2015), l'utilisation de la coupe partielle dans les peuplements F-FT et M-FT est maintenant privilégiée pour créer des petites ouvertures, ce qui imite davantage le régime dominant de perturbations naturelles et favorise la régénération d'essences tolérantes ou semi-tolérantes à l'ombre (MRN 2013). En effet, selon la revue de littérature réalisée par Seymour *et al.* (2002), la formation de petites ouvertures résultant de la mort d'arbres sur pied serait fréquente (50 à 200 ans) dans ces types de peuplements, mais leur superficie couverte serait faible, de même que leur gravité. Cette mort survient soit lorsqu'un arbre ou un petit groupe d'arbres atteint sa maturité, soit lorsqu'une combinaison de divers facteurs mène à une réduction de la vigueur des arbres (McCarthy 2001). Elle suit généralement une baisse de croissance, un dépérissement du houppier ou une progression de la carie dans l'arbre (Barden 1980; Houston 1981). Les facteurs climatiques en cause peuvent être une séquence hivernale ou printanière de gel-dégel, un épisode de sécheresse ou une vague de chaleur (Allen *et al.* 2010; Peng *et al.* 2011). Une rafale peut survenir et causer la mort d'un ou de quelques arbres isolés (Guillemette *et al.* 2017). Un manque de lumière ou des carences nutritionnelles (Bal *et al.* 2015) peuvent aussi réduire la vigueur des arbres et augmenter leur risque de mortalité. Une perturbation causée par un insecte, une maladie ou un animal (Edgar et Westfall 2022), de même qu'une blessure provenant de la chute d'un arbre voisin (Barden 1980) peuvent aussi avoir un effet semblable. Une perturbation partielle occasionnée par un verglas est très rarement relevée dans les peuplements F-FT et M-FT (0,1 %, Tableau 9). Celle-ci endommage les arbres, mais ne cause pas nécessairement une forte mortalité immédiate (Deschênes *et al.* 2019). La hausse du taux de mortalité suivant un verglas grave s'étale sur plusieurs années; certaines essences, comme le hêtre à grandes feuilles et l'ostryer de Virginie, y sont plus sujettes, tandis que d'autres, comme la pruche du Canada et l'érable à sucre, sont moins affectées.

Structure d'âge

Le gradient latitudinal du régime de perturbations se répercute sur la structure d'âge des peuplements (tableau 10). Près de la moitié (49,1 %) de la superficie du sous-type de couvert F-FT est composée de vieux peuplements inéquienner ou de structure irrégulière, et près du tiers (30,3 %), de jeunes peuplements inéquienner ou de structure irrégulière. Seulement 20,6 % du sous-type F-FT est composé de peuplements de structure régulière ou étagée, dont la majorité (13,9 %) est composée de jeunes peuplements de moins de 40 ans. Le sous-type M-FT est aussi majoritairement composé de peuplements inéquienner ou de structure irrégulière (63,4 %). Seulement le tiers environ (36,6 %) de la superficie du sous-type M-FT est composé de peuplements de structure régulière ou étagée, la grande majorité (29,1 %) desquels sont de jeunes peuplements de moins de 40 ans. À l'inverse, les sous-types F-FI et M-FI sont majoritairement de structure régulière ou étagée. Cette prédominance est plus marquée chez le sous-type F-FI (87,3 %) que chez le sous-type M-FI (73,2 %). Dans les deux cas, les classes d'âge 30, 50 et 70 ans représentent chacune environ 20 % de la superficie, alors que les classes d'âge 10 et 90 ans sont un peu moins abondantes. Les couverts R et M-R sont aussi majoritairement de structure régulière ou étagée. Cette dominance de la structure

régulière ou étagée est particulièrement marquée pour le type R (77,5 %) comparativement au sous-type M-R (66,3 %). Finalement, le sous-type F-FN est presque exclusivement composé de jeunes peuplements de structure régulière dans la classe d'âge 0-20 ans (79,7 %) ou 21-40 ans (18,8 %).

Évolution contemporaine du couvert forestier

L'analyse de l'évolution de la superficie occupée par chaque sous-type de couvert depuis la première carte écoforestière révèle que la superficie forestière en régénération (dont le sous-type de couvert ne peut être déterminé) a baissé considérablement depuis la fin du dernier siècle. Selon la première carte écoforestière interprétée à partir de photos aériennes des années 1950 à 1978, près de 21 % de la superficie des terrains forestiers productifs était au stade de régénération, comparativement à 10 % pour la plus récente caractérisation du territoire à partir des années de photographies 2000 à 2015 (Tableau 11). Cela représente plus de 45 000 km² de forêt qui se sont régénérés depuis la fin du dernier siècle. Ces forêts se sont apparemment principalement régénérées en type de couvert M, dont l'occupation est passée de 19,1 % à 28,6 % dans le même intervalle. Cela représente une augmentation d'environ 40 000 km². La superficie occupée par le type de couvert F a elle aussi augmenté, mais de façon plus ténue : environ 10 000 km² de plus en 2000-2015 (62 100 km², 14,9 %), qu'en 1950-1978 (51 600 km², 12,3 %). À l'inverse, l'occupation du type de couvert R a baissé d'environ 5 000 km² dans cet intervalle, ce qui représente une baisse de 1,2 % à l'échelle de la province. La superficie de terrains forestiers improductifs et celle des étendues d'eau ont augmenté d'environ 1 100 et 3 500 km², respectivement, alors que celle des terrains à vocation non forestière a diminué d'environ 3 600 km². Le boisement d'anciennes friches agricoles ainsi que l'inondation de territoire pour la création de bassins hydroélectriques sont des exemples de changements d'utilisation des terres qui peuvent être à l'origine de ces variations. Ces tendances sont cohérentes avec l'augmentation de la biomasse vivante de la forêt boréale et tempérée observée à l'échelle mondiale au cours des 3 dernières décennies, alors que la biomasse de la forêt tropicale a diminué au cours de la même période (Pan *et al.* 2024).

Démographie des principales essences feuillues tolérantes

La figure 6 présente les distributions diamétrales des principales essences FT (érable à sucre, érable rouge, bouleau jaune et hêtre à grandes feuilles), dans chacun des domaines bioclimatiques du système de classification écologique du Québec (Fig. 2; MFFP 2020b). Ce portrait démographique révèle que l'érable rouge est plus abondant, plus performant (pente plus faible) et atteint de plus gros diamètres au sud de la province que dans le nord, et qu'il est pratiquement absent du domaine de la pessière (ce qui explique pourquoi le domaine 6 est exclu de la Fig. 6). L'érable rouge est aussi nettement plus abondant dans le sous-domaine de l'érablière à tilleul de l'Est (2E) que dans celui de l'Ouest (2O).

Ces gradients latitudinaux et longitudinaux sont moins marqués pour l'érable à sucre. Cette essence est un peu moins abondante dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune (4) que dans ceux de l'érablière (1 à 3), mais les dynamiques sont assez comparables entre les régions. Toutefois, son abondance dans le domaine de la sapinière à bouleau à papier (5) est beaucoup plus faible comparativement à l'érable rouge. La forme

Tableau 11. Évolution des superficies du Québec méridional selon le type de couvert ou la catégorie de terrain et les années de prise des photographies aériennes.

Type de couvert	Superficie (1950-1978)		Superficie (1964-1993)		Superficie (1983-2001)		Superficie (2000-2015)	
	× 000 km ²	%						
Feuillu	51,6	12,3	63,8	15,6	61,3	14,9	62,1	14,9
Mixte	80,0	19,1	81,5	19,9	93,4	22,8	119,3	28,6
Résineux	199,2	47,7	182,4	44,5	173,5	42,3	193,8	46,5
En régénération — groupement indéterminé d'essences	87,2	20,9	82,6	20,1	82,2	20,0	41,7	10,0
Terrains forestiers productifs — Total	418,0	100,0	410,3	100,0	410,4	100,0	417,0	100,0
Terrains forestiers improductifs	40,7	—	51,3	—	49,5	—	41,8	—
Terrains à vocation non forestière	36,1	—	33,2	—	33,9	—	32,5	—
Étendues d'eau	49,0	—	49,0	—	50,0	—	52,5	—
Total de la superficie suivie	543,8	—	543,8	—	543,8	—	543,8	—

Source des données : Système d'information forestière par tesselle, données d'origine. Les résineux occupent plus de 75 % de la surface terrière pour les types de couverts résineux, de 25 % à 50 % de la surface terrière pour les types de couverts mixtes et moins de 25 % de la surface terrière pour les types de couverts feuillus.

non linéaire des relations pour ces deux essences d'érables suggère une certaine instabilité dans les populations. Cette divergence par rapport à la droite linéaire est plus marquée pour l'éryable à sucre. Cette baisse de la fréquence des tiges de petits diamètres (environ 10-18 cm) par rapport à la droite linéaire suggère que pendant une période, le recrutement des tiges a été insuffisant pour maintenir la population à l'équilibre. Toutefois, le recrutement contemporain des tiges au seuil diamétrale de la classe de 2 cm semble adéquat pour éventuellement former une droite linéaire avec les classes de diamètres intermédiaires. En effet, dans plusieurs régions, l'ordonnée à l'origine des relations est comparable à celle d'une droite linéaire qui caractériserait la population des tiges de plus grands diamètres (p. ex. : 20 cm et plus). La forme convexe de la relation dans les classes de petits diamètres indique que le recrutement de l'éryable à sucre a augmenté considérablement au cours des dernières années dans le domaine de la sapinière à bouleau à papier (sous-domaines 5E et 5O). Dans ce cas, la valeur de l'ordonnée à l'origine de la relation est nettement supérieure à celle d'une droite linéaire représentant les classes de plus grands diamètres. On peut donc s'attendre à une augmentation de l'abondance dans ces régions plus nordiques.

Ce type de relation, qui illustre une hausse du recrutement, est particulièrement marquée chez le hêtre à grandes feuilles dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Ouest (4O). Les relations diamétrales du hêtre à grandes feuilles indiquent un recrutement contemporain largement supérieur au taux historique qui a permis le maintien de la population actuelle, et ce, dans toutes les régions où l'essence est présente. On peut donc aussi anticiper une augmentation de l'abondance de cette essence dans les sous-domaines où elle est présente, notamment dans le sous-domaine 4O où elle est actuellement moins abondante. Cependant, la maladie corticale du hêtre pourrait grandement influencer la dynamique de la population du hêtre à grandes feuilles au Québec. En effet, cette maladie, qui cause la mort des arbres à brève échéance après l'infection, a très rapidement progressé de l'est vers l'ouest de la province au cours de la dernière décennie (MFFP 2020c). Les prochaines compilations d'inventaires forestiers permettront de documenter cette influence. Sur le plan de la répartition, le hêtre

à grandes feuilles est rarissime dans le domaine de la sapinière à bouleau à papier, alors que l'éryable rouge et l'éryable à sucre parviennent à s'y développer.

Quant au bouleau jaune, l'analyse suggère que la population est relativement stable, malgré la forme légèrement sigmoïdale pivotée de la courbe que l'on perçoit dans certains sous-domaines. La dynamique de l'essence (représentée par la pente de la relation diamétrale) varie aussi selon le sous-domaine bioclimatique. L'essence présente un taux de mortalité de base (et donc, une pente) légèrement plus faible dans les domaines de l'éryablière à bouleau jaune et de la sapinière à bouleau jaune, dans lesquels elle atteint aussi de plus gros diamètres que dans les domaines de la sapinière à bouleau à papier, de l'éryablière à tilleul et de l'éryablière à caryer cordiforme.

Dans l'ensemble, l'analyse révèle une forme convexe de la relation diamétrale dans les petites classes de diamètre pour les essences feuillues typiques de la zone tempérée nordique. De plus, cette forme est souvent plus accentuée dans les domaines situés à la limite nord de l'aire de répartition de ces essences, où elles sont moins abondantes. À partir de ces relations démographiques, on peut anticiper une augmentation de l'importance de ces essences au nord de leur aire de répartition contemporaine, particulièrement pour l'éryable à sucre dans le domaine de la sapinière à bouleau à papier (5) et pour le hêtre à grandes feuilles dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Ouest (4O).

Les changements démographiques des populations d'arbres s'échelonnent sur une longue période variant de quelques décennies à quelques centaines d'années, selon la longévité des essences. À court terme, les changements surviennent d'abord au sein des petites tiges dont l'abondance dépend du taux de recrutement dans la population. Ces jeunes arbres formeront ensuite la population en fonction des taux de croissance et de mortalité des tiges. Les courbes de distribution diamétrale représentent donc la résultante de cette dynamique historique des populations, à partir de laquelle il est possible de tirer certaines inférences sur l'état et la dynamique des populations. L'analyse des changements démographiques contemporains apporte un regard complémentaire, à plus court terme, sur la dynamique des populations.

La figure 7 présente la variation, entre le deuxième (1981-1993) et le quatrième (2003-2018) inventaire forestier du Québec méridional, du nombre d'arbres par classes de 2 cm de diamètre des principales essences FT dans chacun des domaines bioclimatiques du système de classification écologique du Québec (MFFP 2020b). Parmi les faits saillants, ce portrait contemporain révèle qu'en une vingtaine d'années, le nombre de gaules (diamètre < 10 cm) d'éryable à sucre, d'éryable rouge et de bouleau jaune a diminué dans les sous-domaines de l'éryablière, et qu'il a légèrement augmenté dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau à papier de l'Ouest (5O). À l'inverse, le hêtre à grandes feuilles a beaucoup augmenté dans les sous-domaines de l'éryablière à tilleul de l'Ouest (2O) et de l'éryablière à bouleau jaune de l'Ouest (3O). La variation relative du hêtre est parmi les plus importantes variations contemporaines, considérant que cette essence n'est pas la plus abondante dans le couvert forestier dans ces régions. D'ailleurs, l'augmentation de l'occurrence et de l'abondance du hêtre à grandes feuilles dans les éryablières est un phénomène déjà bien documenté dans le nord-est de l'Amérique du Nord (Duchesne et Ouimet 2009, Bose *et al.* 2017, DRF 2017). La maladie corticale du hêtre pourrait toutefois freiner la progression du hêtre à grandes feuilles (MFFP 2020c).

Conclusion

Bien que les FT couvrent une superficie nettement moindre que celle du type de couvert R ($219\,500 \text{ km}^2$), le sous-type de couvert F-FT couvre tout de même $38\,600 \text{ km}^2$ de la province en plus de $21\,600 \text{ km}^2$ supplémentaires dans le sous-type de couvert M-FT. De plus, ces forêts sont situées plus près des territoires habités et des infrastructures, ce qui les rend plus accessibles pour la villégiature, leur aménagement et leur exploitation. L'éryable à sucre, l'éryable rouge et le bouleau jaune sont les 3 principales essences FT typiques de la zone tempérée nordique au Québec, mais elles sont mélangées avec des dizaines d'autres essences dans cette zone de transition vers la zone boréale.

L'origine des peuplements du sous-type de couvert F-FT est généralement inconnue, car peu de perturbations d'origine y sont documentées, contrairement aux forêts de la zone boréale. Cependant, les peuplements de ce type ont subi plus de perturbations partielles, surtout des perturbations d'origine humaine, comme les coupes partielles. De plus, les arbres morts isolés ou en petits groupes ne sont pas cartographiés. Au sein de la zone tempérée nordique, il existe des disparités locales et régionales, dues à la qualité de station ou à l'historique des perturbations, qui ne sont toutefois pas considérées dans la présente analyse.

L'analyse de l'évolution contemporaine du couvert forestier révèle qu'à l'échelle de la province, la forêt s'est régénérée au cours des dernières décennies. Cela s'est fait principalement

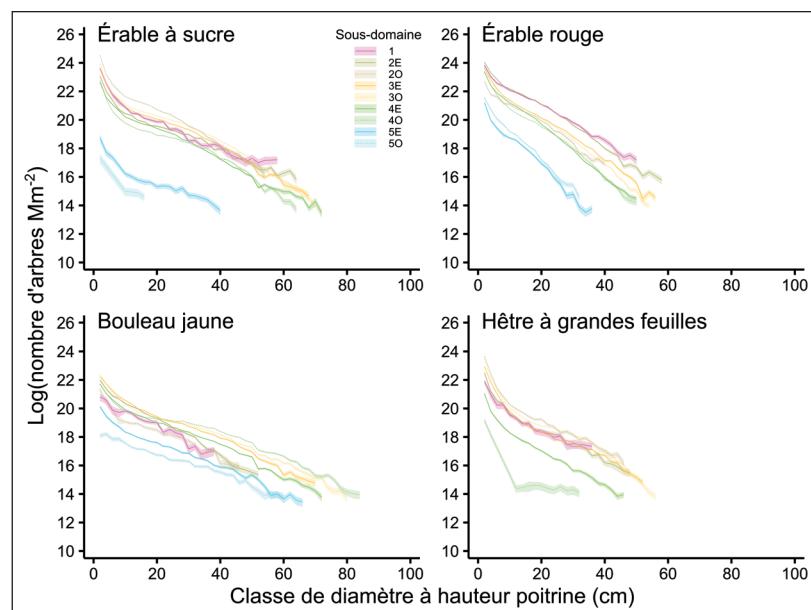


Fig. 6. Distributions diamétrales [nombre d'arbres par classes de 2 cm de diamètre à hauteur de poitrine] des principales essences feuillues tolérantes (éryable à sucre, éryable rouge, bouleau jaune et hêtre) dans le cadre du quatrième inventaire forestier du Québec méridional (2003-2018), pour chacun des sous-domaines bioclimatiques du système de classification écologique du Québec. Les zones ombragées délimitent un intervalle de ± 1 erreur type par rapport à la moyenne. Seules les moyennes compilées à partir d'au moins 10 placettes-échantillons sont illustrées. Domaines bioclimatiques : 1 = éryablière à caryer cordiforme; 2 = éryablière à tilleul; 3 = éryablière à bouleau jaune; 4 = sapinière à bouleau jaune; 5 = sapinière à bouleau à papier; 6 = pessière à mousses. Les lettres E et O distinguent respectivement les sous-domaines bioclimatiques de l'Est et de l'Ouest.

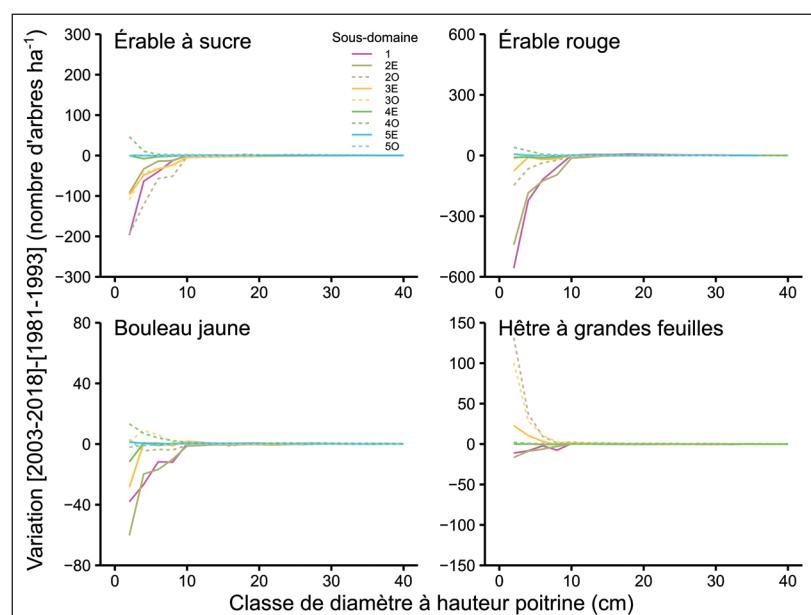


Fig. 7. Variation du nombre d'arbres des principales essences feuillues tolérantes entre le deuxième (1981-1993) et le quatrième (2003-2018) inventaire forestier du Québec méridional, par classe de diamètre de 2 cm [mesuré à hauteur de poitrine, soit 1,3 m], pour chacun des sous-domaines bioclimatiques du système de classification écologiques du Québec. Domaines bioclimatiques : 1 = éryablière à caryer cordiforme; 2 = éryablière à tilleul; 3 = éryablière à bouleau jaune; 4 = sapinière à bouleau jaune; 5 = sapinière à bouleau à papier; 6 = pessière à mousses. Les lettres E et O distinguent respectivement les sous-domaines bioclimatiques de l'Est et de l'Ouest.

en type de couvert M et dans une moindre mesure, en type de couvert F. À l'inverse, la superficie occupée par le type de couvert R a légèrement diminué depuis la fin du dernier siècle.

La variation des distributions diamétrales des principales essences FT révèle un léger déclin des populations d'érable à sucre, d'érable rouge et de bouleau jaune et une croissance de celle du hêtre à grandes feuilles aux cours des dernières décennies. Bien qu'un déclin de l'occurrence et de l'abondance de l'érable à sucre au profit du hêtre à grandes feuilles dans le nord-est de l'Amérique soit documenté depuis plusieurs années, le portrait démographique démontre que l'érable à sucre est encore abondant dans toutes les classes de diamètre (2 cm et plus, mesuré à 1,3 m du sol) et que, conséquemment, le maintien de sa population ne semble pas menacé pour le moment. La population d'érables à sucre présente un léger déséquilibre, avec un déficit de petites tiges marchandes (diamètre de 10 à 18 cm environ), mais ce déséquilibre pourra éventuellement être compensé par l'abondance de tiges de plus petits diamètres. De plus, les compilations révèlent que l'abondance de ces deux essences devrait augmenter à la limite nord de leur aire de répartition, possiblement en raison des changements climatiques. La maladie corticale du hêtre pourrait toutefois freiner la progression du hêtre à grandes feuilles. Ces constats tirés du portrait démographique de ces essences à l'échelle des sous-domaines bioclimatiques n'excluent toutefois pas que des problèmes de régénération de l'érable à sucre et de prolifération du hêtre à grandes feuilles puissent survenir localement ou régionalement.

Ce portrait et ces constats établissent les fondements de la réflexion à propos des principaux enjeux contemporains en forêt décidue tempérée au Québec. Ces principaux enjeux, en lien notamment avec les changements globaux et l'aménagement forestier, sont présentés plus en détail dans les parties suivantes de cette série d'articles.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier M. Jean Girard pour sa révision et ses suggestions pertinentes concernant une version préliminaire de cet article, M. Jean Noël pour son assistance dans le traitement des données spatiales, ainsi que Mme Denise Tousignant pour la révision linguistique de la version française du manuscrit. Nous tenons également à remercier le réviseur anonyme pour ses suggestions constructives, qui ont contribué à améliorer la qualité de cet article.

Références

- Allen, C.D., A.K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, T. Kitzberger, A. Rigling, D.D. Breshears et al. 2010.** A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.* 259(4): 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Bal, T.L., A.J. Storer, M.F. Jurgensen, P.V. Doskey et M.C. Amacher. 2015.** Nutrient stress predisposes and contributes to sugar maple dieback across its northern range: A review. *Forestry* 88(1): 64–83. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu051>
- Barden, L.S. 1980.** Tree replacement in a cove hardwood forest of the Southern Appalachians. *Oikos* 35(1): 16–19. <https://doi.org/10.2307/3544722>
- BFEC. 2023.** [Bureau du Forestier en chef]. Feux de forêt de l'été 2023. Gouvernement du Québec, Bureau du Forestier en chef. Communiqué de presse du 29 novembre 2023. <https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/feux-de-foret-de-lete-2023-52494>
- BMMB. 2022.** [Bureau de mise en marché des bois]. Modèle d'évaluation de rentabilité des investissements sylvicoles (MÉRIS). Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Bureau de mise en marché des bois. <https://bmmb.gouv.qc.ca/media/29260/meris.zip>
- Bose, A.K., A. Weiskittel et R.G. Wagner. 2017.** A three-decade assessment of climate-associated changes in forest composition across the north-eastern USA. *J. Appl. Ecol.* 54(6): 1592–1604. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12917>
- Boulet, B. 2015.** Le portrait de la forêt feuillue et mixte à feuillus durs au Québec — Survol historique. Document d'information. Gouvernement du Québec, Bureau du forestier en chef. 67 p. + 5 annexes. https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/Portrait-de-la-foret-feuillue_Boulet_Bilan1.pdf
- Boulet, B. et D. Pin. 2015.** Le portrait de la forêt feuillue et mixte à feuillus durs au Québec — Les perturbations et leur effet sur la dynamique forestière. Document d'information. Gouvernement du Québec, Bureau du forestier en chef. 31 p. https://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/Perturbation_Pin_Bilan2008-2013.pdf
- Brisson, J. et A. Bouchard. 2003.** In the past two centuries, human activities have caused major changes in the tree species composition of southern Québec, Canada. *Ecoscience* 10(2): 236–246. <https://doi.org/10.1080/11956860.2003.11682771>
- Burns, R.M. et B.H. Honkala** (édit.). 1990. *Silvics of North America: 1. Conifers; 2. Hardwoods.* USDA For. Serv., Agri. Hand. 654. 877 p. Washington, DC. https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/table_of_contents.htm
- Cale, J.A., S.A. Teale, J.L. West, L.I. Zhang, D.R. Castello, P. Devlin et J.D. Castello. 2014.** A quantitative index of forest structural sustainability. *Forests* 5(7): 1618–1634. <https://doi.org/10.3390/f5071618>
- Couillard, P.-L., M. Bouchard, J. Laflamme et F. Hébert. 2022.** Zonage des régimes de feux du Québec méridional. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière no 189. 23 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/MRF189.pdf>
- Coughlin, J., C. Clark, L. Pardo, R. Sabo et J. Ash. 2023.** Sensitive tree species remain at risk despite improved air quality benefits to US forests. *Nature Sustainability* 6: 1607–1619. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01203-8>
- Crow, T.R. 1990.** *Tilia Americana* L. dans Burns, R.M. et B.H. Honkala (édit.), *Silvics of North America: 2. Hardwoods.* USDA For. Serv., Agric. Hand. 654. Washington, DC. https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/volume_2/tilia/americana.htm
- Cui, J., M. Zheng, Z. Bian, N. Pan, H. Tian, X. Zhang, Z. Qiu, J. Xu et B. Gu. 2024.** Elevated CO₂ levels promote both carbon and nitrogen cycling in global forests. *Nat. Clim. Change* 14: 511–517. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-01973-9>
- Danneyrolles, V., S. Dupuis, G. Fortin, M. Leroyer, A. de Römer, R. Terrail, M. Vellend, Y. Boucher, J. Laflamme et al. 2019.** Stronger influence of anthropogenic disturbance than climate change on century-scale compositional changes in northern forests. *Nature Commun.* 10(1): 1265. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09265-z>
- De Liocourt, F. 1898.** De l'aménagement des sapinières. *Bulletin de la Société Forestière Franche-Comté et Belfort* 6: 396–409.

- De Liocourt, F.** 1900. Sapinières — Manuscrit conservé à l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts. Nancy.
- Deschênes, É., M.H. Brice et J. Brisson.** 2019. Long-term impact of a major ice storm on tree mortality in an old-growth forest. *For. Ecol. Manage.* 448: 386–394. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.018>
- Drever, C.R., C. Messier, Y. Bergeron et F. Doyon.** 2006. Fire and canopy species composition in the Great Lakes-St. Lawrence forest of Témiscamingue, Québec. *For. Ecol. Manage.* 231(1-3): 27–37. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.039>
- DRF.** 2017. [Direction de la recherche forestière]. Expansion du hêtre à grandes feuilles et déclin de l'érable à sucre au Québec : portrait de la situation, défis et pistes de solution. Avis scientifique du comité chargé d'étudier l'écologie et la sylviculture des peuplements contenant du hêtre et de l'érable. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis scientifique, 146 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/AvisScientHEG-ERS.pdf>
- Duchesne, L. et R. Ouimet.** 2008. Population dynamics of tree species in southern Quebec, Canada: 1970–2005. *For. Ecol. Manage.* 255(7): 3001–3012. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.02.008>
- Duchesne, L. et R. Ouimet.** 2009. Present-day expansion of American beech in northeastern hardwood forest: Does soil base status matter? *Can. J. For. Res.* 39(12): 2273–2282. <https://doi.org/10.1139/X09-172>
- Edgar, C.B. et J.A. Westfall.** 2022. Timing and extent of forest disturbance in the Laurentian mixed forest. *Front. For. Glob. Change* 5: 963796. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.963796>
- FAO.** 2022. [Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture]. Forêts d'Amérique du Nord, édition 2.0. Données numériques vectorielles [1:10,000,000] [en ligne]. Commission de Coopération environnementale (CCE), Commission des forêts pour l'Amérique du Nord (CFAN). <http://www.cec.org/fr/atlas-environnemental-de-lamerique-du-nord/forets-damerique-du-nord-2022/> (visité 15 juillet 2022).
- Frelich, L.E. et C.G. Lorimer.** 1991. Natural disturbance regimes in hemlock-hardwood forests of the Upper Great Lakes region. *Ecol. Monogr.* 61(2): 145–164. <https://doi.org/10.2307/1943005>
- Garnas, J.R., M.P. Ayres, A.M. Liebhold et C. Evans.** 2011. Subcontinental impacts of an invasive tree disease on forest structure and dynamics. *J. Ecol.* 99(2): 532–541. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01791.x>
- Guillemette, F., M.-M. Gauthier et R. Ouimet.** 2017. Partitioning risks of tree mortality by modes of death in managed and unmanaged northern hardwoods and mixedwoods. *For. Chron.* 93(3): 246–258. <https://doi.org/10.5558/tfc2017-033>
- Hijmans, R.J.** 2023. *raster*: Geographic data analysis and modeling. R package version 3.6-26 [en ligne]. <https://cran.r-project.org/package=raster>
- Himes, A., J. Bauhus, S. Adhikari, S.K. Barik, H. Brown, A. Brunner, P.J. Burton, L. Coll, A.W. D'Amato et al.** 2023. Forestry in the face of global change: Results of a global survey of professionals. *Curr. For. Rep.* 9: 473–489. <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00205-1>
- Houston, D.R. 1981. Stress triggered tree diseases: The diebacks and declines. USDA For. Serv., Northeastern For. Exp. Sta., n° NE-INF-41-81. Broomall, PA. 36 p. https://www.nrs.fs.usda.gov/pubs/inf/ne_inf_41_81.pdf
- Janowiak, M.K., A.W. D'Amato, C.W. Swanston, L. Iverson, F.R. Thompson III, W.D. Dijk, S. Matthews, M.P. Peters,**
- A. Prasad et al.** 2018. New England and Northern New York forest ecosystem vulnerability assessment and synthesis: A report from the New England climate change response framework project. USDA For. Ser., North. Res. Sta., Gen. Tech. Repo. NRF-173, Newtown Square, PA. 234 p. <https://doi.org/10.2737/nrs-gtr-173>
- Leak, W.B.** 2002. Origin of sigmoid diameter distributions. USDA For. Serv., North. Res. Sta., Res. Pap. NE-718. Newtown Square, PA. 10 p. <https://doi.org/10.2737/NE-RP-718>
- Lumley, T.** 2004. Analysis of complex survey samples. *J. Stat. Soft.* 9(8): 1–19. <https://doi.org/10.18637/jss.v009.i08>
- Manion, P.D. et D.H. Griffin.** 2001. Large landscape scale analysis of tree death in the Adirondack Park, New York. *For. Sci.* 47(4): 542–549. <https://doi.org/10.1093/forestscience/47.4.542>
- McCarthy, J.** 2001. Gap dynamics of forest trees: A review with particular attention to boreal forests. *Environ. Rev.* 9(1): 1–59. [https://doi.org/10.1139\(er-9-1-1](https://doi.org/10.1139(er-9-1-1)
- MFFP.** 2015. [Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs] Norme de stratification écoforestière — Quatrième inventaire du Québec méridional. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Dir. inv. for. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/norme-stratification.pdf>
- MFFP.** 2016a. [Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs]. Norme d'inventaire écoforestier, Placettes-échantillons temporaires, édition 2016. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 172 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/Norme-PET.pdf>
- MFFP.** 2016b. [Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs]. Intégration des enjeux écologiques dans les plans d'aménagement forestier intégré de 2018-2023, Cahier 4.1 — Enjeux liés à la composition végétale. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers. 86 p. https://cdn- contenu.quebec.ca/cdn-contenu/forets/documents/gestion/CH_4_1_Composition_vegetale_MRNF.pdf
- MFFP.** 2017. [Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs]. Méthodologie des compilations forestières du 4^e inventaire écoforestier du Québec méridional. Cas particulier des estimations k-NN. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 36 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/methodologie-compilations-forestieres-4e-inventaire-ecoforestier-qc-meridional.pdf>
- MFFP.** 2020a. [Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs]. Cartographie du 5^e inventaire écoforestier du Québec méridional — Méthodes et données associées, 3^e édition. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/carto_5E_methodes_donnees.pdf
- MFFP.** 2020b. [Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs]. Classification écologique du territoire québécois. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers [en ligne]. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/systeme-hierarchique-de-classification-ecologique-du-territoire>
- MFFP.** 2020c. [Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs]. Évolution de la maladie corticale du hêtre au Québec en 2019, Québec, Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la protection des forêts, 14 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/Evolution-maladie-corticale_2019.pdf

- MFFP. 2021.** [Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs]. Classification écologique du territoire québécois. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 11 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/classification_ecologique_territoire_quebecois.pdf
- MFFP. 2022a.** [Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs]. Placettes-échantillons temporaires du deuxième inventaire [en ligne]. Partenariat Données Québec. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/placettes-echantillons-temporaires-2e-inventaire-1980-1993> (visité 15 juillet 2022).
- MFFP. 2022b.** [Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs]. Placettes-échantillons temporaires du quatrième inventaire [en ligne]. Partenariat Données Québec. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/placettes-echantillons-temporaires-4e-inventaire-2004-a-aujourd-hui> (visité 15 juillet 2022).
- MFFP. 2022c.** [Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs]. Carte écoforestière originale de l'inventaire écoforestier du Québec méridional [en ligne]. Partenariat Données Québec. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/resultats-d-inventaire-et-carte-ecoforestiere> (visité 14 juillet 2022).
- MFFP. 2022d.** [Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs]. Système d'information forestière par tesselle (SIFORT) [en ligne]. Partenariat Données Québec. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/systeme-d-information-forestiere-par-tesselle-sifort> (visité 14 juillet 2022).
- MRN. 2013.** [Ministère des Ressources naturelles]. Le guide sylvicole du Québec, Tome 2. Les concepts et l'application de la sylviculture, ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier, Les Publications du Québec, 744 p.
- MRNF. 2009a.** [Ministère des Ressources naturelles et de la Faune]. Normes de cartographie écoforestière — troisième inventaire écoforestier. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction des inventaires forestiers. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/norme-cartographie-ecoforestiere.pdf>
- MRNF. 2009b.** [Ministère des Ressources naturelles et de la Faune]. Le portrait de l'évolution de la forêt publique sous aménagement du Québec méridional des années 1970 aux années 2000. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Forêt Québec, Direction des inventaires forestiers et Direction de l'environnement et de la protection des forêts, 142 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/evolution-foret-publique.pdf>
- MRNF. 2023.** [Ministère des Ressources naturelles et des Forêts]. Insectes, maladies et feux dans les forêts du Québec en 2022. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et Forêts, Direction de la protection des forêts. 74 p. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/RA_2022_DPF.pdf
- Oliver, C. D. et B.A. Larson. 1996.** Forest stand dynamics, Update Edition. Yale School of the Environment Other Publications. 1. https://elischolar.library.yale.edu/fes_pubs/1
- Pan, Y., R.A. Birdsey, O.L. Phillips, R.A. Houghton, J. Fang, P.E. Kauppi, H. Keith, W.A. Kurz, A. Ito et al. 2024.** The enduring world forest carbon sink. *Nature* 631: 563–569. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>
- Pebesma, E. 2018.** Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. *The R Journal* 10(1): 439–446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Pebesma, E. et R. Bivand. 2023.** Spatial data science: with applications in R. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429459016>
- Pelletier, G., Y. Dumont, and M. Bédard. 2007.** SIFORT—Système d'Information FOREstière par Tesselle, Manuel de l'usager. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune. iii+125 p. https://diffusion.mffp.gouv.qc.ca/Diffusion/DonneeGratuite/Foret/DONNEES_FOR_ECO_SUD/SIFORT/1-Documentation/Manuel_usager_SIFORT_123.pdf
- Peng, C., Z. Ma, X. Lei, Q. Zhu, H. Chen, W. Wang, S. Liu, W. Li, X. Fang et al. 2011.** A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests. *Nat. Clim. Change* 1: 467–471. <https://doi.org/10.1038/nclimate1293>
- Picard, N. et D. Gasparotto. 2016.** Liocourt's law for tree diameter distribution in forest stands. *Annals For. Sci.* 73: 751–755. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0563-4>
- R Core Team. 2024.** R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienne, Autriche [en ligne]. <https://www.r-project.org/>
- Reed, S.P., A.A. Royo, A.T. Fotis, K.S. Knight, C.E. Flower et P.S. Curtis. 2021.** The long-term impacts of deer herbivory in determining temperate forest stand and canopy structural complexity. *J. Appl. Ecol.* 59(3): 812–821. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14095>
- Rubin, B., P. Manion et D. Faber-Langendoen. 2006.** Diameter distributions and structural sustainability in forests. *For. Ecol. Manage.* 222(1–3): 427–438. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.049>
- Seidl, R., D. Thom, M. Kautz, D. Martin-Benito, M. Peltoniemi, G. Vacchiano, J. Wild, D. Ascoli, M. Petr et al. 2017.** Forest disturbances under climate change. *Nature Clim Change* 7: 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Seymour, R.S., A.S. White et P.G. DeMaynadier. 2002.** Natural disturbance regimes in northeastern North America—evaluating silvicultural systems using natural scales and frequencies. *For. Ecol. Manage.* 155(1–3): 357–367. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00572-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00572-2)
- Thompson, I.D., J.H. Simard et R.D. Titman. 2006.** Historical changes in white pine (*Pinus strobus* L.) density in Algonquin Park, Ontario, during the 19th century. *Natural Areas Journal* 26(1): 61–71. [https://doi.org/10.3375/0885-8608\(2006\)26\[61:HCIWPP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3375/0885-8608(2006)26[61:HCIWPP]2.0.CO;2)
- Trumbore, S., P. Brando et H. Hartmann. 2015.** Forest health and global change. *Science* 349(6250): 814–818. <https://doi.org/10.1126/science.aac6759>
- Wickham, H. 2016.** *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer-Verlag, New York. 260 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>
- Wickham H., R. François, L. Henry, K. Müller et D. Vaughan. 2023.** *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.1.4. [en ligne]. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr> (20 octobre 2024).
- Wilke, C.O. 2024.** *cowplot: Streamlined plot theme and plot annotations for “ggplot2”*. R package version 1.1.3. [en ligne]. <https://cran.r-project.org/package=cowplot> (20 octobre 2024).
- Williams, G.M., M.D. Ginzel, Z. Ma, D.C. Adams, F. Campbell, G.M. Lovett, M.B. Pildain, K.F. Raffa, K.J.K. Gandhi et al. 2023.** The global forest health crisis: A public-good social dilemma in need of international collective action. *Annu. Rev. Phytopathol.* 61: 377–401. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021722-024626>