



Influence du climat et des facteurs édaphiques sur la fertilité des sols dans la région écologique du Massif du lac Jacques-Cartier

Rock Ouimet¹, Louis Duchesne¹ et Jean-David Moore

Résumé

Des symptômes de carences minérales et de dépérissement sont observés dans les plantations d'épinettes blanches (*Picea glauca* (Moench) Voss) dans la région écologique du Massif du lac Jacques-Cartier (région écologique 5e). Dans cette note, nous avons voulu déterminer les caractéristiques des stations indicatrices de la richesse du sol. L'analyse des données de sol et d'inventaire écoforestier du réseau québécois de placettes-échantillons permanentes montre que la composition physicochimique du sol est associée à plusieurs caractéristiques des stations, en particulier l'altitude (une variable de substitution pour le régime de température), le groupe d'espèces indicatrices, l'épaisseur de l'humus, la classe d'âge du peuplement et les perturbations antérieures subies par celui-ci. Ces variables peuvent servir de guide pour déterminer les sites propices à la plantation d'épinettes blanches dans cette région de la forêt boréale.

Mots-clés : épinette blanche, forêt boréale, groupe d'espèces indicatrices, physicochimie du sol, région écologique 5e, sol forestier

Abstract

*Symptoms of mineral deficiencies and of decline are observed in white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) plantations in the Massif du lac Jacques-Cartier ecological region (region 5e). In this note, we wanted to determine the station characteristics that were indicative of soil quality. Analysis of soil and forest inventory data from Québec's permanent sample plot network shows that soil physicochemical composition is associated with many characteristics of the stations, particularly altitude (a proxy for temperature regime), group of indicator species, humus thickness, stand age class and previous disturbances. These variables can be used as guides to determine suitable sites for white spruce plantation in this region of the boreal forest.*

Keywords: white spruce, boreal forest, indicator species group, soil physicochemistry, ecological region 5e, forest soil.

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-7994
Télécopieur : 418 643-2165
Courriel : recherche.forestiere@mrnf.gouv.qc.ca
Site Web : [recherche forestière gouvernementale](http://recherche.forestiere.gouvernementale)

¹ Correspondance : rock.ouimet@mrnf.gouv.qc.ca et louis.duchesne@mrnf.gouv.qc.ca

1. Introduction

Au Québec, afin d'augmenter la résilience des écosystèmes face aux perturbations naturelles et anthropiques et en raison de sa productivité et de son intérêt pour les transformateurs, l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) est souvent privilégiée en plantation ou en enrichissement de la régénération après coupe. Cette essence est aussi plus résistante que d'autres résineux aux épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.) (Nealis et Régnière 2004). Depuis 1997, certains forestiers se sont toutefois inquiétés d'observer des symptômes de dépérissement de l'épinette blanche, notamment dans la réserve faunique des Laurentides (figure 1). Les symptômes observés comprennent la perte des aiguilles de l'intérieur de la couronne vers l'extérieur, la chlorose des aiguilles, des entre-nœuds nains avec des aiguilles courtes, la réduction de la croissance radiale et, à un stade plus avancé, la mort des rameaux, des branches ou de l'arbre (Ouimet *et al.* 2013a). Les symptômes de décoloration sont particulièrement apparents sur le feuillage de l'année courante et celui de 2 ans, comme c'est généralement le cas pour le dépérissement des conifères (Garrec *et al.* 1991). On observe aussi dans cette région des symptômes de carence minérale chez le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), pour lequel des suivis à long terme effectués à la forêt d'enseignement et de recherche Montmorency de l'Université Laval indiquent une baisse des teneurs en potassium (K) et en magnésium (Mg) dans le feuillage (Ouimet et Moore 2015).

Ces nouveaux symptômes de chlorose chez ces résineux font penser que des changements dans l'approvisionnement en éléments nutritifs et dans la fertilité du sol sont survenus (Ouimet *et al.* 2015). Les perturbations naturelles comme les épidémies d'insectes, l'exploitation forestière et les dépôts atmosphériques acides ont pu avoir un effet néfaste sur les réserves du sol en éléments minéraux de la forêt boréale au Québec (Duchesne et Houle 2006, 2008). En réponse à ces constats, le Comité d'aménagement de la forêt d'enseignement et de recherche de l'Université Laval (Forêt Montmorency) a décrété depuis 2012 un moratoire sur la plantation d'épinettes blanches sur l'ensemble de son territoire. Cependant, le problème de santé de l'épinette blanche n'est qu'un enjeu parmi les nombreux autres soulevés par les parties prenantes dans cette région (Université Laval 2021). Des inquiétudes subsistent entre autres quant à l'appauvrissement des sols à la suite de la récolte de biomasse forestière, aux



Figure 1. Photos prises dans l'une des plantations d'épinette blanche âgée de 6 ans dans un secteur en altitude dans Charlevoix. La majorité des plants montraient des symptômes de chlorose ainsi que des pousses terminales mortes comme sur la photo du bas. Photos : Rock Ouimet.

effets des changements climatiques et au maintien des habitats naturels. La question du maintien de la fertilité des sols est aussi une préoccupation majeure.

Dans cette note, nous proposons d'évaluer quelles caractéristiques des stations sont indicatrices de la richesse du sol dans la région écologique du Massif du lac Jacques-Cartier (région écologique 5e). Grâce aux récentes analyses de sol qui proviennent du réseau des placettes permanentes du ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF), nous avons pu brosser un premier portrait de la fertilité du sol selon les caractéristiques des stations. Plus spécifiquement, nous voulions vérifier l'hypothèse que la composition physicochimique des sols en cations basiques est liée en partie à certaines caractéristiques des stations dans cette région. Notre objectif principal est de guider les aménagistes pour déterminer les sites propices ou non à la plantation d'épinette blanche. Nous rapportons également les résultats d'expertise sur de jeunes plantations d'épinettes blanches installées en altitude dans cette région, et qui montraient des symptômes de carence.

2. Matériel et méthodes

2.1. Milieu

La région écologique 5e couvre une superficie d'environ 12 200 km² englobant presque entièrement la réserve faunique des Laurentides ainsi que les parcs nationaux de la Jacques-Cartier, des Grands-Jardins et des Hautes-Gorges-de-la-Rivière-Malbaie. L'altitude varie de 400 à 1000 m, ce qui se traduit par un large gradient de précipitations (de 1000 à 1600 mm·an⁻¹) et de température annuelle moyenne (-2,5 à +2,5 °C; figure 2). Le climat est classifié

comme étant subpolaire, humide à subhumide et continental (Blouin et Berger 2004). Les données de la station météorologique située à la Forêt Montmorency (Ouimet *et al.* 2013b) confirment que le climat subit un réchauffement notable depuis les dernières décennies, à l'image des changements observés dans l'est de l'Amérique du Nord (Vincent *et al.* 2018).

Le relief de la région écologique 5e est accidenté et se compose surtout de hautes collines et de monts où dominent les dépôts de till glaciaire (dépôt 1A) plus ou moins épais. Ces derniers sont d'ailleurs

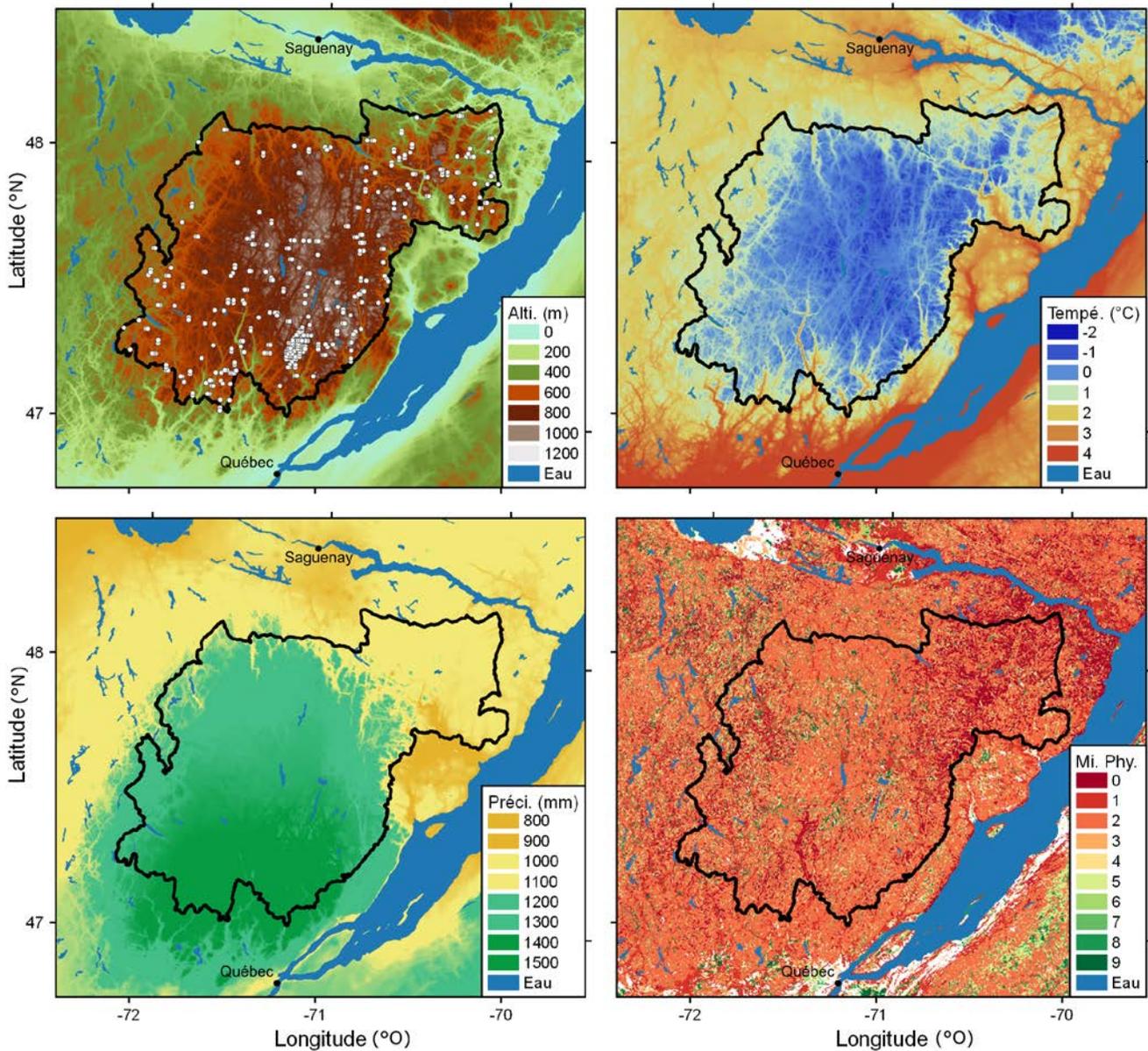


Figure 2. Cartes thématiques de la région écologique 5e : altitude (Alti.) et emplacement des placettes-échantillons permanentes, température moyenne annuelle (Tempé.), précipitations annuelles moyennes (Préci.) et milieu physique (Mi. Phys.). Voir les définitions au tableau 1. Les données de climat sont les moyennes 1980-2010.

présents dans 95 % des stations qui ont servi aux analyses. Les dépôts fluvioglaciaires sont peu fréquents. Sur le plan géologique, ce territoire fait partie du Bouclier canadien. Le substrat rocheux, de nature cristalline, est formé surtout de roches ignées et métamorphiques. Les sols sont généralement des podzols de texture grossière à moyenne et de drainage mésique.

La région écologique 5e est dominée par des forêts boréales composées de sapin baumier, de bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marshall), d'épinette blanche et d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.), ce qui correspond à la végétation potentielle de la sapinière à bouleau à papier (MS2) qui croît sur les pentes longues et régulières des collines et des monts. En haute altitude (> 800 m), l'abondance des espèces arbustives comme l'érable à épis (*Acer spicatum* Lamarck), qui caractérise cette végétation potentielle, diminue au profit des espèces herbacées. La végétation potentielle de la sapinière à bouleau à papier d'élévation (MS2_E) est le type de peuplement le plus abondant dans la partie centrale de la région où l'altitude est plus élevée. Celle de la sapinière à bouleau à papier montagnarde (MS4), dont les tiges sont adaptées à un climat plus rigoureux, est plus rare et occupe seulement les sommets exposés des hautes collines. Les végétations potentielles de la sapinière à épinette noire (RS2) et de la pessière noire à mousses ou à éricacées (RE2) ou encore à sphaignes (RE3) sont aussi présentes dans la région sur des milieux plus secs ou plus humides. Les végétations potentielles tempérées, notamment les érablières à bouleau jaune (FE3) et les sapinières à bouleau jaune (MS1) apparaissent sporadiquement en bordure du territoire ou dans les vallées profondes. Les principales perturbations dans ces peuplements sont l'aménagement forestier, les épidémies de tordeuses des bourgeons de l'épinette et les feux. Ces derniers sont à l'origine de plusieurs peuplements où le bouleau à papier est sous-dominant (Couillard *et al.* 2012).

2.2. Source des données

L'échantillonnage des sols des placettes-échantillons permanentes (PEP) a débuté en 2001. Dans cette étude, nous avons employé les données d'inventaire dendrométrique de la Direction des inventaires forestiers du MRNF correspondant à la date d'échantillonnage des sols. La PEP est une unité d'échantillonnage circulaire d'une superficie de 400 m². Des suivis aux 10 ans environ permettent de suivre la croissance de chaque tige individuelle. À chaque visite, les variables suivantes sont évaluées

sur chaque tige ayant un DHP (diamètre à hauteur de poitrine, mesuré à une hauteur de 1,3 m) de plus de 9 cm : état et essence de l'arbre, diamètre (mesuré au gallon circonférentiel), pourcentage de défoliation et qualité de la tige pour la transformation en bois d'œuvre. On y relève aussi les caractéristiques écologiques de la station, que ce soit au niveau du sol ou des plantes de sous-bois (Direction des inventaires forestiers 2016). Dans plus de la moitié des cas, l'humus et, si possible, l'horizon B minéral sont échantillonnés près du centre des PEP pour en analyser la texture et le contenu en éléments au laboratoire. Au total, 623 PEP, dont 531 avec des données d'analyses de sol, font partie de la région écologique du Massif du lac Jacques-Cartier (figure 2).

2.3. Analyse du sol

Les échantillons de sol ont été séchés à l'air, puis passés dans un tamis de 2 mm. Les cations échangeables ont été mesurés par extraction au NH₄Cl 1N (12 h) et analysés par spectroscopie d'émission atomique au plasma. L'hydrogène échangeable a été analysé par la mesure du pH de l'extrait, et l'acidité échangeable, par la somme de l'hydrogène échangeable et de l'aluminium échangeable. Le pH des échantillons a été mesuré dans un rapport 1:2 (m/v) avec l'eau.

2.4. Traitements des données

Pour chacun des horizons de sol organique (humus) et minéral (B), nous avons calculé la proportion des cations échangeables (calcium [Ca], K, Mg et acidité [Ac]). Nous avons ensuite transformé ces valeurs en logarithme de rapports isométriques (LRI) en procédant à une partition binaire séquentielle des éléments échangeables de l'humus et de l'horizon B (figure 3). Le LRI se calcule de la façon suivante (Egozcue *et al.* 2003) :

$$LRI(x_i) = \left(\frac{x_i}{g(x)} \right)_{i=1, \dots, D} \cdot V$$

où x_i = proportion de l'élément i du vecteur de composition de l'ensemble d'éléments qui va de 1 à D ,

$g(x)$ = moyenne géométrique du vecteur de composition, et

V = matrice $D \times (D-1)$ représentant une partition binaire séquentielle des éléments de la composition et où la somme de chaque colonne = 0.

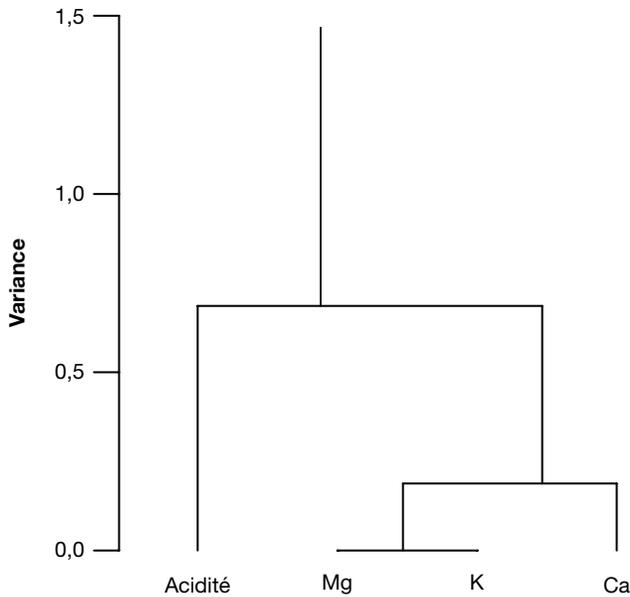


Figure 3. Partitionnement des éléments échangeables de l'humus et du sol en groupes binaires séquentiels. La longueur du raccord vertical de chaque jonction représente la proportion de la variance des rapports en question (exprimés en logarithmes de rapports [*log ratio*]) par rapport à la somme de la variance de tous les rapports.

L'utilisation des valeurs de composition transformées en LRI est nécessaire dans l'analyse de la variance afin d'éviter les biais mathématiques, la non-normalité de la distribution et la redondance des variables exprimées en proportion ou en pourcentage (Parent *et al.* 2012). Ces valeurs transformées sont en fait des rapports orthogonaux indépendants entre les éléments ou groupes d'éléments. La transformation des proportions en LRI amène les données dans un espace euclidien, enlève la redondance des données compositionnelles et permet de créer des variables non biaisées et interprétables. Les données de composition en cations échangeables de l'humus et de l'horizon B minéral ont été transformées à l'aide du module *compositions* dans l'environnement R (van den Boogaart et Tolosana Delgado 2013).

Dans cette analyse, nous avons partitionné les valeurs de LRI des éléments des sols selon 3 groupes binaires (figure 3) :

1) Logarithme du rapport $\frac{\text{basses échangeables}}{\text{acidité échangeable}}$

2) Logarithme du rapport $\frac{Ca}{(K+Mg)}$

3) Logarithme du rapport $\frac{K}{Mg}$

Dans le cas bien documenté d'une autre essence (érable à sucre), les rapports entre éléments sont des variables généralement plus étroitement reliées au statut nutritif foliaire que leurs concentrations brutes (Ouimet *et al.* 2013b). Nous avons déterminé les variables de station explicatives de la composition physicochimique du sol en employant un modèle linéaire avec chacune des variables LRI de l'humus et de l'horizon B comme variables dépendantes, et la liste des caractéristiques des stations du tableau 1 comme variables indépendantes, sans interactions entre elles. Au préalable, nous avons vérifié de trois manières que ces variables ne montraient pas de multicolinéarité importante entre elles :

- En calculant leur facteur d'inflation de la variance (*vif*, pour *variance inflation factor*) avec la fonction *vive* du module *car* dans l'environnement R (Fox et Weisberg 2019). Seules les variables indépendantes obtenant un *vif* < 5 ont été conservées dans les analyses de la variance.
- Avec le V de Cramer accompagné d'un test du khi carré (χ^2) par la fonction *cramerV* du module *rcompanion* (Mangiafico 2021) dans l'environnement R (R Core Team 2020). Le V de Cramer permet de mesurer l'intensité du lien entre deux variables étudiées. Plus V s'approche de zéro, moins les variables étudiées sont associées. Au contraire, il s'approche de 1 lorsque les deux variables sont complètement liées l'une à l'autre.
- En calculant le coefficient de corrélation de Pearson lors de l'analyse préliminaire entre les variables quantitatives.

Dans les analyses avec modèle linéaire, les hypothèses sous-jacentes aux modèles (normalité de la distribution, homogénéité de la variance et indépendance des erreurs) ont été vérifiées grâce à l'examen visuel de graphiques des résidus. Afin de s'assurer de la validité des tests effectués, l'hétérogénéité de la variance présente dans certaines analyses a été prise en compte en spécifiant des variances propres aux facteurs des stations concernées. Ces analyses ont été réalisées avec la fonction *gls* dans le module *nlme* de R (Pinheiro *et al.* 2021).

Tableau 1. Caractéristiques des stations des placettes-échantillons permanentes de la région écologique 5e.

Groupe de variables	Variable	Valeurs ou étendue des valeurs	
Climat	Altitude	207-1091 m	
	Température moyenne annuelle	-1,58 à +2,87 °C	
	Précipitations annuelles	889-1519 mm	
Peuplement	Végétation potentielle (Vég. Pot.)	FE3 (érable à bouleau jaune), MS1 (sapinière à bouleau jaune), MS2 (sapinière à bouleau blanc), MS4 (sapinière à bouleau blanc montagnarde), RE2 (pessière noire à mousses ou à éricacées), RS2 (sapinière à épinette noire), RS3 (sapinière à épinette noire et sphaignes)	
	Groupe d'espèces indicatrices*	AUC (aulne crispé), AUR (aulne rugueux), CON (cornouiller du Canada), ERE (érable à épis), DRS (dryoptéride spinuleuse), GRS (graminées), HYS (hypne éclatante), KAA (kalmia à feuilles étroites), PLS (hypne de Schreber), RUI (ronce du mont Ida), SPS (sphaignes)	
	Classe synthèse d'âge	10, 30, 50, 70, JIN (jeunes peuplements inéquiennes), 90+, VIN (vieux peuplements inéquiennes)	
	Perturbation partielle subie dans le passé	brûlis partiel, chablis partiel, coupe partielle, dépérissement partiel des feuillus, épidémie légère, éclaircie précommerciale	
	Épaisseur de l'humus (Épais. Hum.)	2-58 cm	
	Station	Classe de pente	A (0-3 %), B (4-8 %), C (9 à 15 %), D (16 à 30 %), E (31-40 %), F (> 40 %)
Classe de drainage		1 (rapide), 2 (bon), 3 (modéré), 4 (imparfait), 5-6 (mauvais à très mauvais)	
Présence de drainage latéral		0 (aucun), 1 (présence)	
Classe synthèse de dépôt de surface		1A (till), 1B (till avec morphologie), 2A (juxtaglaciaire), 2B (proglaciaire), 3 (fluviatile), 4GS (glaciolacustre), 8 (altération)	
Classe d'épaisseur du dépôt de surface		Très mince (<0,25 m), mince (0,25-0,5 m), moyen (0,5-1 m), épais (>1 m)	
Milieu physique (sol)		0	(dépôt très mince, xérique à hydrique, de texture variée),
		1	(dépôt mince à épais, mésique, de texture grossière),
		2	(dépôt mince à épais, mésique, de texture moyenne),
		4	(dépôt mince à épais, subhydrique, de texture grossière),
		5	(dépôt mince à épais, subhydrique, de texture moyenne),
7	(dépôt minéral, hydrique, de texture variée)		

* Le groupe d'espèces indicatrices réfère ici aux groupes écologiques élémentaires (tableau 3.3 dans Blouin et Berger 2004).

2.5. Expertise sur des plantations d'épinettes blanches

En novembre 2021, nous avons eu l'occasion de visiter 4 plantations établies en 2016 dans un secteur de haute altitude (800–900 m) dans Charlevoix. Elles étaient situées sur des tills glaciaires minces à profonds, de classe de drainage 2 à 3, et étaient classées dans le type écologique de la sapinière à bouleau blanc d'altitude (MS22E). La superficie des plantations totalisait 38 ha. Selon la carte écoforestière du 3^e inventaire décennal, le groupement d'essences du peuplement précédent était la sapinière à épinette noire.

Nous avons prélevé 7 échantillons foliaires des pousses de l'année courante dans l'ensemble de ces plantations, puis nous les avons analysés en laboratoire pour en déterminer la teneur en N, P, K, Ca et Mg. Nous avons comparé les résultats des analyses aux normes CND (sigle signifiant *Compositional Nutrient Diagnosis* en anglais, ou diagnostic de composition nutritive) pour l'épinette blanche, telles que mises au point par Quesnel *et al.* (2006), afin de déterminer les carences nutritionnelles à l'origine de la chlorose. Pour un élément nutritif donné, un indice CND supérieur à 1 indique un excès de nutrition, tandis qu'un indice CND inférieur à -1 indique une carence.

3. Résultats

3.1. Liens entre les variables de l'environnement

Plusieurs variables de l'environnement sont corrélées entre elles dans la région écologique 5e. Le climat, synthétisé par l'altitude, est très corrélé à la température moyenne annuelle ($r = -0,960$), mais moins aux précipitations annuelles moyennes ($r = -0,396$; figure 4). L'épaisseur du dépôt de surface est fortement associée à la texture (classe synthèse) du sol ($\chi^2 = 451$ [$p \leq 0,001$], V de Cramer = 0,530) et au milieu physique ($\chi^2 = 463$ [$p \leq 0,001$], V de Cramer = 0,529). Enfin, la classe de drainage est évidemment fortement associée à la classe synthèse de drainage ($\chi^2 = 812$ [$p \leq 0,001$], V de Cramer = 0,707). Nous n'avons donc conservé que l'altitude, les précipitations totales annuelles, l'épaisseur du dépôt de surface, la classe de drainage et les autres variables qui ne montraient pas de colinéarité dans l'analyse des données. Toutefois, il faut garder en mémoire que les variables retenues représentent aussi celles mises de côté (par exemple, l'altitude représente aussi la température moyenne annuelle).

3.2. Composition physicochimique du sol

Certaines caractéristiques de station dans la région écologique 5e sont associées à la composition physicochimique de l'humus et du sol minéral en cations échangeables. L'altitude, les précipitations totales annuelles, la végétation potentielle, le groupe d'espèces indicatrices, la classe d'âge du peuplement, les perturbations récentes et l'épaisseur de l'humus sont ressortis parmi les variables explicatives (tableau 2). Le dépôt de surface, la présence de drainage latéral et la classe de pente n'étaient pas des variables significatives ($p \geq 0,100$).

Lorsque les logarithmiques de rapports isométriques sont retransformés en données de composition, il apparaît que la proportion de la capacité d'échange cationique du sol occupée par les cations basiques, c'est-à-dire la saturation en bases, diminue avec l'altitude au profit des cations acides dans l'humus et dans l'horizon B des sols ($p \leq 0,030$; figure 5). La quantité de précipitations totales est associée positivement aux réserves d'acidité de l'humus et du sol ($p < 0,001$). Dans le sol minéral, cependant, le K se comporte différemment, puisque sa proportion tend à diminuer avec l'augmentation des précipitations ($p = 0,001$).

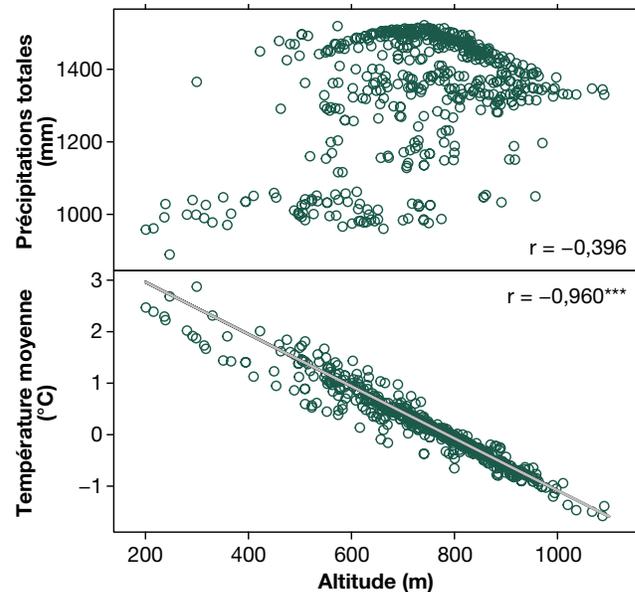


Figure 4. Relations entre l'altitude et les précipitations totales annuelles (en haut) et la température moyenne annuelle (en bas) dans les placettes permanentes de la région écologique 5e. Le coefficient de corrélation de chaque relation est indiqué (***) : $p < 0,001$.

Le type de végétation potentielle est lui aussi associé étroitement à la composition physicochimique de l'humus et de l'horizon B. La végétation potentielle de l'érablière à bouleau jaune (FE3) est la plus riche en cations basiques, tandis que celles des sapinières à bouleau à papier montagnardes (MS4), des pessières noires à mousses ou à éricacées (RE2) et des sapinières à épinette noire et sphaignes (RS3) sont les plus pauvres en cations basiques.

Les groupes d'espèces indicatrices à érable à épis (ERE) et à hypne éclatante (HYS) sont généralement les plus riches en cations basiques échangeables et les plus faibles en acidité échangeable dans l'humus (figure 5A). En ordre décroissant de saturation de l'humus en K, on trouve les groupes d'espèces indicatrices ERE, à aulne crispé (AUC), à cornouiller du Canada (CON), à hypne de Schreber (PLS) et à dryoptéride spinuleuse (DRS). Les groupes d'espèces indicatrices à ERE et à graminées (GRS) sont parmi ceux dont l'horizon B minéral des sols possède la proportion la plus élevée en K (figure 5B).

Dans l'humus, l'acidité d'échange et le rapport K/Mg tendent à augmenter avec la classe d'âge des peuplements ($p \leq 0,047$). Par contraste, dans l'horizon B minéral, la classe d'âge n'est pas associée à la composition physicochimique ($p \geq 0,190$), celle-

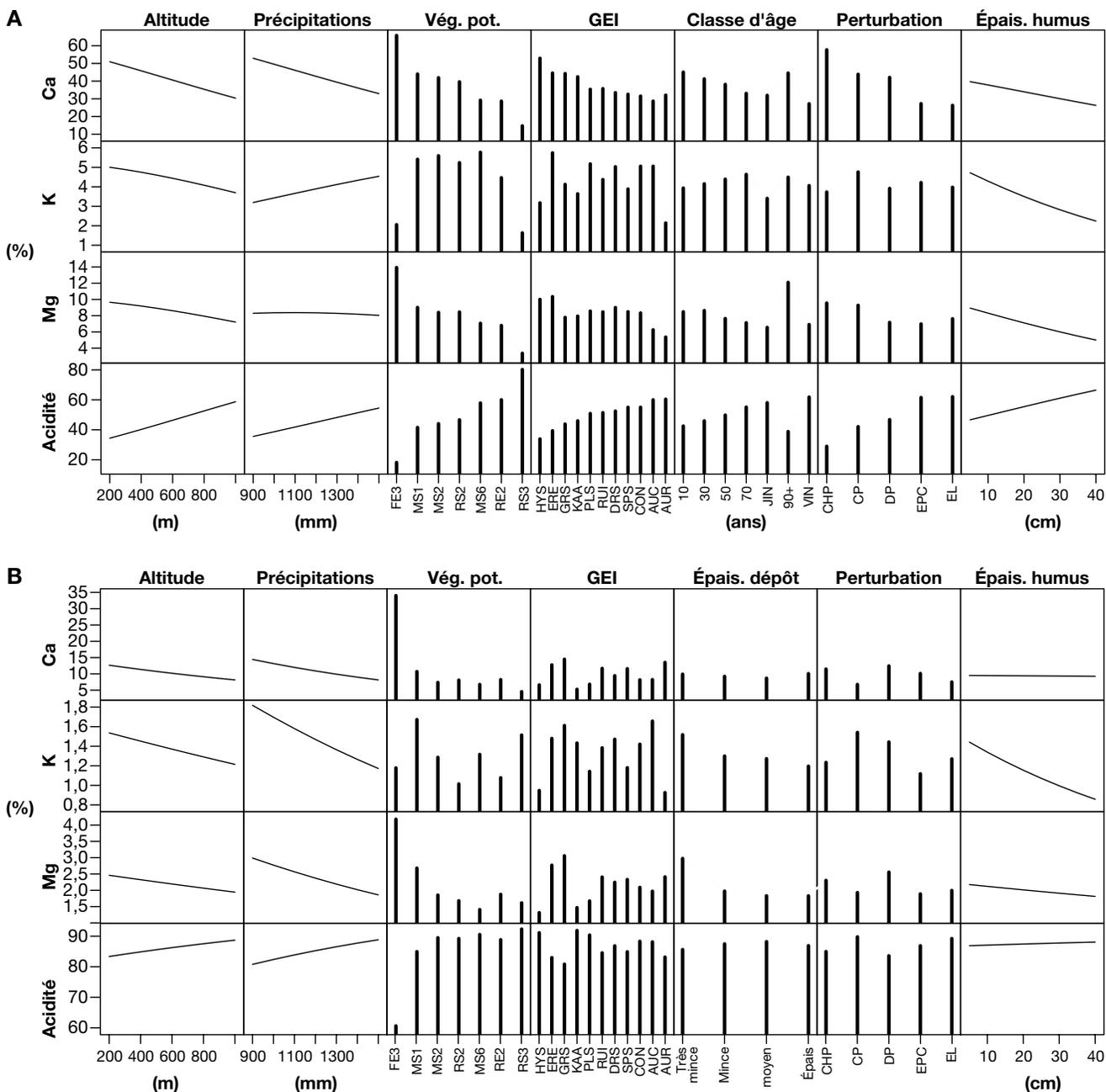


Figure 5. Relation entre des caractéristiques des stations (altitude, précipitations, végétation potentielle, groupe d'espèces indicatrices [GEI], épaisseur du dépôt, perturbation et épaisseur de l'humus) et la composition physicochimique du sol en cations échangeables (acidité et concentrations en Mg, en K et en Ca), exprimée en pourcentage de la capacité d'échange cationique (valeur de LRI retransformée à partir des moyennes ajustées des modèles d'ANOVA), A) dans l'humus; B) dans l'horizon B minéral. Les acronymes des noms de ces variables sont définis au tableau 1.

ci étant plutôt liée en partie à l'épaisseur du dépôt de surface, dont la saturation en K et Mg diminue avec l'épaisseur ($p = 0,006$).

Parmi les perturbations antérieures, le chablis partiel, la coupe partielle et le dépérissement partiel des feuillus sont liés à une plus faible acidité d'échange

dans l'humus, tandis que l'éclaircie précommerciale et les épidémies légères sont associées à des conditions d'humus plus saturées en acidité ($p = 0,025$). Finalement, l'augmentation de l'épaisseur de l'humus est liée à une réduction de sa saturation en bases ainsi qu'à une réduction de la saturation en K dans l'horizon B minéral ($p \leq 0,033$).

Tableau 2. Analyse de la variance de la relation entre la composition physicochimique des sols en cations échangeables (en valeurs logarithmes de rapports isométriques, ou LRI) et les variables indépendantes représentant les caractéristiques des stations qui sont significatives* dans la région écologique 5e. Les valeurs de *p* associées aux variables statistiquement significatives (*p* < 0,05) apparaissent en gras.

Couche	Variable	Degrés de liberté	Variables LRI					
			$\frac{Ca+K+Mg}{Acidité}$		$\frac{Ca}{(K+Mg)}$		$\frac{K}{Mg}$	
			F	<i>p</i>	F	<i>p</i>	F	<i>p</i>
Humus	Altitude	1	6,86	0,009	0,66	0,416	0,00	0,949
	Précipitations	1	4,80	0,029	13,53	<0,001	12,36	0,001
	Végétation potentielle	6	4,88	<0,001	0,75	0,608	2,07	0,057
	Groupe d'espèces indicatrices	10	1,40	0,178	1,73	0,074	2,78	0,003
	Classe d'âge	7	2,10	0,047	0,81	0,576	2,11	0,042
	Perturbation	4	2,61	0,025	1,40	0,224	0,59	0,706
	Épaisseur de l'humus	1	7,73	0,006	0,86	0,354	0,70	0,404
Horizon B	Altitude	1	4,76	0,030	1,03	0,311	0,00	0,995
	Précipitations	1	29,21	<0,001	0,84	0,361	0,13	0,720
	Végétation potentielle	6	2,03	0,061	3,88	0,001	3,29	0,004
	Groupe d'espèces indicatrices	10	6,34	<0,001	2,80	0,002	3,83	<0,001
	Épaisseur du dépôt	3	2,93	0,033	4,18	0,006	2,60	0,052
	Perturbation	4	1,23	0,294	2,15	0,063	1,96	0,083
	Épaisseur de l'humus	1	2,48	0,116	3,23	0,073	4,59	0,033

* Les valeurs qui ne sont significatives pour aucune variable LRI ont été préalablement exclues de l'analyse finale.

3.3. Détermination des carences nutritionnelles dans les plantations

Les indices CND des plants d'épinette blanche des plantations visitées en haute altitude montrent clairement une carence en Ca (figure 6). Deux plants montrent également une carence soit en P, soit en Mg. La plupart montrent un excès de N. Par ailleurs, en plus de montrer des signes de chlorose, la plupart des plants montrent une malformation de la pousse terminale (figure 1). Une des hypothèses retenues pour expliquer cette malformation serait un gel hâtif à l'automne ou tardif au printemps.

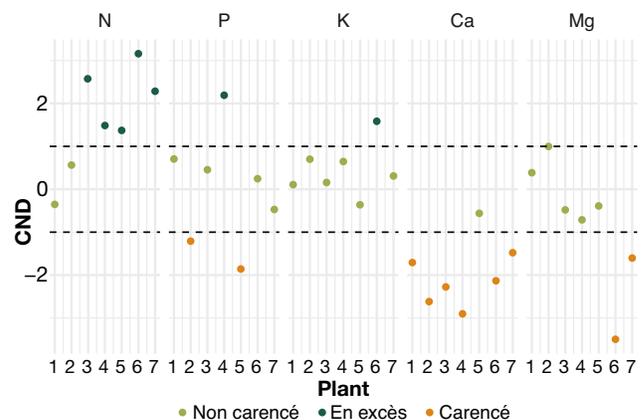


Figure 6. Indices CND (sigle signifiant *Compositional Nutrient Diagnosis* en anglais, ou diagnostic de composition nutritive) de 7 plants d'épinette blanche échantillonnés parmi 4 plantations âgées de 6 ans et situées en haute altitude dans le secteur de Charlevoix.

4. Discussion

4.1. Fertilité du sol et caractéristiques des stations

Les résultats d'analyse appuient notre hypothèse de départ que la composition physicochimique des sols est liée en partie à certaines caractéristiques de station. Ils concordent avec ceux obtenus par Brais *et al.* (1995), qui rapportent que l'âge et la composition en essences du peuplement sont liés au changement de la disponibilité des éléments nutritifs dans l'humus. Le consensus est large selon lequel la présence de certains groupes d'espèces ou de certaines espèces du sous-bois est associée à des conditions distinctives du milieu (Ringius et Sims 1997) tels les régimes hydrique et nutritif, par exemple dans le domaine bioclimatique de la pessière subboréale en Colombie-Britannique (Wang 2000), dans la taïga forestière en Russie (Lukina *et al.* 2019) et dans la forêt boréale en Finlande (Kuusipalo 1983). En Europe, on utilise même les relevés phytosociologiques pour évaluer le régime nutritif des stations forestières et d'autres caractéristiques de l'environnement comme le régime hydrique du sol, celui de lumière et celui de température (Bartelheimer et Poschlod 2016). Les espèces indicatrices sont employées pour classifier les types forestiers dans le système de classification écologique du Québec (Blouin et Berger 2004). Cette association plantes-milieu s'explique en partie par les différences entre les plantes ou groupes de plantes quant à leurs exigences nutritives, édaphiques et climatiques (Podani 2006), la composition chimique de la litière qu'elles produisent (Bartelheimer et Poschlod 2016) et l'activité du biote du sol qui participe au cycle des éléments nutritifs et du carbone dans l'écosystème (Andrianarisoa *et al.* 2009).

Parmi les stations les plus riches dans cette région écologique figurent celles où l'on a observé du chablis ou du dépérissement partiel chez les feuillus, ou dans lesquelles on a effectué des coupes partielles. Celles-ci ont toutes engendré une ouverture partielle du couvert, dans laquelle la température du sol a augmenté d'au moins 1°C (Prévoist et Raymond 2012), ce qui a dû entraîner une hausse du taux de décomposition de la matière organique du sol et de la recirculation des éléments nutritifs. C'est ainsi que le régime de température du sol et son taux de décomposition de la matière organique peuvent augmenter radicalement pendant plusieurs années lorsque la surface du sol est perturbée (Kubin et Kempainen 1994, Jiménez Esquilín *et al.* 2008).

4.2. Plantations d'épinettes blanches en altitude

La carence en Ca diagnostiquée dans les jeunes plantations en haute altitude et la mortalité des pousses terminales indiquent que l'épinette blanche, du moins cette provenance, est mal adaptée aux conditions de sol ou de climat à cette altitude. Ces observations contrastent avec celles provenant d'études antérieures sur la fertilisation qui indiquaient que le K était le nutriment le plus limitant dans ces écosystèmes boréaux (Ouimet et Moore 2015, Ouimet *et al.* 2013a). Tout comme le N, le K est très mobile dans les écosystèmes forestiers; sa disponibilité dépend plus de son flux dans le cycle biogéochimique de l'écosystème (dans lequel la composition en espèces joue un rôle important dans la rétention des éléments nutritifs mobiles) que de son flux dans le cycle géochimique, comme dans le cas du Ca (Tripler *et al.* 2006). Les conditions de station et l'âge des arbres sont possiblement la cause des différences de carence observées. Dans une revue du statut nutritif de la sapinière, les jeunes peuplements montraient des concentrations foliaires en Ca plus faibles que les peuplements plus âgés (Ouimet et Moore 2015), ce qui pourrait expliquer les faibles concentrations de Ca dans ces plants.

Les symptômes observés de dommages dans les plantations pourraient être attribuables au choix de la provenance d'épinette blanche, mais la littérature sur le sujet n'appuie pas cette explication. Dans une étude sur les effets d'un gel hâtif dans des tests de provenances d'épinette blanche, le taux de dommages causés par le gel était similaire entre les sites et les sources de semences, et la gravité des dommages causés par le gel n'était pas liée à la latitude d'origine des semences (Benomar *et al.* 2022). De même, la perte de la croissance apicale ne variait pas significativement selon les sources de semences, y compris les sources locales. Cependant, la proportion d'arbres gravement endommagés était linéairement et inversement liée à la hauteur des arbres avant le gel. Cela permet de croire que dans les plantations que nous avons visitées, les dommages liés au gel diminueront à mesure que les plants croîtront.

4.3. Implications pour l'aménagement

D'après nos résultats, les stations les plus riches dans cette région écologique — et les plus propices au succès de plantation de l'épinette blanche — sont celles à basse altitude (< 800 m), à humus mince, à érable à épis (ERE), qui sont jeunes et où l'on a

observé du chablis, du dépérissement partiel chez les feuillus et où l'on a effectué des coupes partielles. Les stations à groupe d'espèces indicatrices ERE se trouvent d'ailleurs seulement à des altitudes de moins de 800 m dans la région écologique du Massif du lac Jacques-Cartier. Par contre, dans cette région écologique, les stations en haute altitude (≥ 800 m), à humus épais (> 20 cm), à kalmia à feuilles étroites (KAA) ou âgées (70 ans et plus, ce qui correspond à la classe d'âge des vieux peuplements inéquiennes de structure régulière [VIN]) apparaissent les moins riches et donc les moins propices à la plantation d'épinettes blanches.

Les analyses physicochimiques du sol montrent aussi que les stations parmi les plus riches en termes de fertilité sont celles à érable à épis (groupe d'espèces indicatrices ERE). Ce classement correspond bien à celui que l'on trouve dans le guide de reconnaissance des types écologiques dans ce territoire (Blouin et Berger 2004). Ce guide indique aussi que les stations à kalmia à feuilles étroites (KAA) sont les plus pauvres en éléments nutritifs, ce que corroborent nos analyses. Cependant, dans ce guide, les stations à hypne éclatante (HYS) sont considérées comme ayant une richesse relative moyenne, alors que selon nos résultats, ce groupe d'espèces indicatrices est plutôt associé aux stations les plus riches. Dans les guides de reconnaissance des types écologiques, le classement de la richesse relative des stations a été déterminé par l'analyse de la pente arrière, la diversité de la flore, le pH de l'humus mesuré sur le terrain, la présence de drainage latéral et le type d'humus. Cette interprétation du régime nutritif fourni par ces guides mériterait d'être révisée en tenant compte des données actuellement disponibles au sujet des propriétés physicochimiques des sols forestiers du Québec.

Dans un contexte de réchauffement climatique, on peut penser que le climat deviendra plus propice pour soutenir la croissance et le développement de l'épinette blanche en altitude dans la région écologique 5e. Cependant, il faut aussi s'attendre à l'augmentation de la fréquence, du moment et de la durée d'événements climatiques extrêmes tels que les sécheresses, les gels-dégels et les vagues de chaleur (IPCC 2022). Dans ce contexte, les observations présentées ici indiquent que l'on devrait plutôt traiter les peuplements dans ces écosystèmes de façon à encourager l'établissement de la régénération naturelle avec l'ouverture partielle du couvert. Par exemple, il a été démontré qu'un couvert

de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx) offre une protection contre le gel aux jeunes épinettes blanches dans les peuplements mixtes (Filipescu et Comeau 2011, Man et Lieffers 1999). D'ailleurs, d'après nos observations, l'épinette noire se régénérerait avec vigueur sous les plants d'épinette blanche dans les plantations visitées situées en altitude. D'autres observations à une plus grande échelle sont nécessaires avant de conclure avec certitude qu'il existe ou non un problème de développement de l'épinette blanche en altitude.

5. Conclusion

Dans la région écologique du Massif du lac Jacques-Cartier, nos analyses indiquent que plusieurs caractéristiques de station sont associées à la composition physicochimique en cations échangeables de l'humus et de l'horizon B minéral. Parmi les variables étudiées, l'altitude (qui est une variable de substitution pour le régime de température) et le groupe d'espèces indicatrices sont les meilleurs indicateurs de la richesse du sol. Ces variables pourraient servir à cibler les sites propices ou non au reboisement avec l'épinette blanche. Les recherches doivent toutefois se poursuivre pour tirer profit de nouvelles analyses de sol afin d'explorer la relation entre les propriétés du sol et la composition et la productivité des forêts de ce territoire.

Remerciements

Nous tenons à remercier nos collègues de la Direction des inventaires forestiers qui ont amassé les données des placettes-échantillons permanentes et les échantillons de sol, le laboratoire de chimie organique et inorganique de la Direction de la recherche forestière (DRF) pour l'analyse de la composition physicochimique des sols, M. Charles Vigeant-Langlois, ing.f., de la Direction de la gestion des forêts de la région Capitale-Nationale-Chaudière-Appalaches, pour nous avoir signalé les plantations à problème, les deux réviseurs anonymes pour leurs commentaires très constructifs, de même que M^{me} Armelle Ginet, M^{me} Maude-Emmanuelle Hajjaj et M^{me} Denise Tousignant pour l'édition finale et M^{me} Maripierre Jalbert pour le graphisme. Les travaux décrits dans cette note de recherche forestière ont été financés dans le cadre du projet n° 142332065 du créneau Écosystèmes et environnement de la DRF du MRNF.

Références

- Andrianarisoa, K.S., B. Zeller, J.L. Dupouey et E. Dambrine, 2009. *Comparing indicators of N status of 50 beech stands (Fagus sylvatica L.) in northeastern France*. For. Ecol. Manage. 257(11): 2241-2253. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.037>
- Bartelheimer, M. et P. Poschlod, 2016. *Functional characterizations of Ellenberg indicator values—a review on ecophysiological determinants*. Funct. Ecol. 30(4): 506-516. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12531>.
- Benomar, L., J. Bousquet, M. Perron, J. Beaulieu et M. Lamara, 2022. *Tree maladaptation under mid-latitude early spring warming and late cold spell: implications for assisted migration*. Front. Plant Sci. 13 (920852). <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.920852>
- Blouin, J.L. et J.P. Berger, 2004. *Guide de reconnaissance des types écologiques des régions écologiques 5e — Massif du lac Jacques-Cartier et 5f — Massif du mont Valin*. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Forêt Québec, Direction des inventaires forestiers. 194 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/guide-ecologique-5ef.pdf>
- Brais, S., C. Camiré, Y. Bergeron et D. Paré, 1995. *Changes in nutrient availability and forest floor characteristics in relation to stand age and forest composition in the southern part of the boreal forest of northwestern Quebec*. For. Ecol. Manage. 76(1-3): 181-189. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03541-H](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03541-H)
- Couillard, P.-L., S. Payette et P. Grondin, 2012. *Recent impact of fire on high-altitude balsam fir forests in south-central Quebec*. Can. J. For. Res. 42(7): 1289-1305. <https://doi.org/10.1139/x2012-081>
- Direction des inventaires forestiers, 2016. *Normes d'inventaire écoforestier — Placettes-échantillons permanentes. Normes techniques. Édition 2016. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs*. 238 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/Norme-PEP.pdf>
- Duchesne, L. et D. Houle, 2006. *Base cation cycling in a pristine watershed of the Canadian boreal forest*. Biogeochemistry 78(2006): 195-216. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-4174-7>
- Duchesne, L. et D. Houle, 2008. *Impact of nutrient removal through harvesting on the sustainability of the boreal forest*. Ecol. Applic. 18(7): 1642-1651. <https://www.jstor.org/stable/40062239>
- Egozcue, J.J., V. Pawlowsky-Glahn, G. Mateu-Figueras et C. Barceló-Vidal, 2003. *Isometric logratio transformation for compositional data analysis*. Math. Geol. 35(3): 279-300. <https://doi.org/10.1023/A:1023818214614>
- Filipescu, C.N. et P.G. Comeau, 2011. *Influence of Populus tremuloides density on air and soil temperature*. Scand. J. For. Res. 26(5): 421-428. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.570784>
- Fox, J. et S. Weisberg, 2019. *An R companion to applied regression, Third Edition*. SAGE Publications, Thousand Oaks, CA (États-Unis). 608 p.
- Garrec, J.P., E. Laitat, I. Richardin et C.W. Rose, 1991. *Dépérissement forestier et perturbations minérales aux niveaux histologique et cellulaire dans les aiguilles de Picea abies L. Étude par microanalyse X*. Ann. For. Sci. 48(3) : 321-332. <https://doi.org/10.1051/forest:19910307>
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK et New York, NY, USA. 3056 p. https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf
- Jiménez Esquilín, A.E., M.E. Stromberger et W.D. Shepperd, 2008. *Soil scarification and wild-fire interactions and effects on microbial communities and carbon*. Soil Sci. Soc. Am. J. 72(1): 111-118. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0292>
- Kubin, E. et L. Kempainen, 1994. *Effect of soil preparation of boreal spruce forest on air and soil temperature conditions in forest regeneration areas*. Acta For. Fenn. 244: article id 7506. <https://doi.org/10.14214/aff.7506>
- Kuusipalo, J., 1983. *Distribution of vegetation on mesic forest sites in relation to some characteristics of the tree stand and soil fertility*. Sylva Fenn. 17(4): 403-418. <https://doi.org/10.14214/sf.a15184>
- Lukina, N.V., E.V. Tikhonova, M.A. Danilova, O.N. Bakhmet, A.M. Kryshen, D.N. Tebenkova, A.I. Kuznetsova, V.E. Smirnov, T.Y. Braslavskaya, A.V. Gornov, M.P. Shashkov, S.V. Knyazeva, A.D. Kataev, L.G. Isaeva et N.V. Zukert, 2019. *Associations between forest vegetation and the fertility of soil organic horizons in northwestern Russia*. For. Ecosyst. 6(1): 34. <http://dx.doi.org/10.1186/s40663-019-0190-2>

- Man, R. et V.J. Lieffers, 1999. *Effects of shelterwood and site preparation on microclimate and establishment of white spruce seedlings in a boreal mixedwood forest*. *For. Chron.* 75(5) : 837-844. <https://doi.org/10.5558/tfc75837-5>
- Mangiafico, S., 2021. *rcompanion: Functions to support extension education program evaluation*. Dans : Module R version 2.4.1. <https://CRAN.R-project.org/package=rcompanion>
- Nealis, V.G. et J. Régnière, 2004. *Insect-host relationships influencing disturbance by the spruce budworm in a boreal mixedwood forest*. *Can. J. For. Res.* 34(9): 1870-1882. <https://doi.org/10.1139/x04-061>
- Ouimet, R. et J.-D. Moore, 2015. *Effects of fertilization and liming on tree growth, vitality and nutrient status in boreal balsam fir stands*. *For. Ecol. Manage.* 345 : 39-49. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.032>
- Ouimet, R., J.-D. Moore, L. Duchesne et C. Camiré, 2013a. *Etiology of a recent white spruce decline: role of potassium deficiency, past disturbances, and climate change*. *Can. J. For. Res.* 43(1): 66-77. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0344>
- Ouimet, R., J.-D. Moore et L. Duchesne, 2013b. *Soil thresholds update for diagnosing foliar calcium, potassium, or phosphorus deficiency of sugar maple*. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 44(16): 2408-2427. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.803563>
- Ouimet, R., J.-D. Moore et L. Duchesne, 2015. *Évolution du statut nutritif des sapinières à la Forêt Montmorency entre 1967 et 2011*. *Nat. Can.* 139(2): 35-41. <https://doi.org/10.7202/1030819ar>
- Parent, S.É., L.É. Parent, D.E. Rozanne, A. Hernandez et W. Natale, 2012. «Nutrient balance as paradigm of plant and soil chemometrics». Dans : Issaka, R.N. (édit.). *Soil fertility*. IntechOpen. p. 83-114. <https://doi.org/10.5772/53343>
- Pinheiro, J., D. Bates, S. DebRoy, D. Sarkar et R Core team, 2021. *nlme: Linear and nonlinear mixed effects models*. R package version 3.1-152. R package version 3.1-152. <https://rdocumentation.org/packages/nlme/versions/3.1-152>
- Podani, J., 2006. *Braun-Blanquet's legacy and data analysis in vegetation science*. *J. Veg. Sci.* 17(1): 113-117. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2006.tb02429.x>
- Prévost, M. et P. Raymond, 2012. *Effect of gap size, aspect and slope on available light and soil temperature after patch-selection cutting in yellow birch-conifer stands, Quebec, Canada*. *For. Ecol. Manage.* 274: 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.020>
- Quesnel, P.-O., B. Côté, J.W. Fyles et A.D. Munson, 2006. *Optimum nutrient concentrations and CND scores of mature white spruce determined using a boundary-line approach and spatial variation of tree growth and nutrition*. *J. Plant Nutr.* 29: 1999-2018. <https://doi.org/10.1080/01904160600928177>
- R Core Team, 2020. *R: A language and environment for statistical computing*. Version 4.0.3. R Foundation for Statistical Computing. Vienne, Autriche. <https://www.R-project.org>
- Ringius, G.S. et R.A. Sims, 1997. *Plantes indicatrices des forêts canadiennes*. Ressources naturelles Canada, Service canadien des Forêts, Administration centrale, Direction des sciences. Ottawa, ON. 217 p.
- Tripler, C.E., S.S. Kaushal, G.E. Likens et M. Todd Walter, 2006. *Patterns in potassium dynamics in forest ecosystems*. *Ecol. Lett.* 9(4): 451-466. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00891.x>
- Université Laval, 2021. *Plan d'aménagement forestier intégré tactique, période intérimaire 2021-2023, Forêt Montmorency-secteur B, Forêt d'enseignement et de recherche, unité d'aménagement 031-51*. Version consultation. 109 p. [https://www.foretmontmorency.ca/assets/documents/PAFI-T_FM-B\(031-051\)_2021-23_vConsultation.pdf](https://www.foretmontmorency.ca/assets/documents/PAFI-T_FM-B(031-051)_2021-23_vConsultation.pdf)
- van den Boogaart, K.G. et R. Tolosana-Delgado, 2013. *Analysing compositional data with R*. Dans la série *UseR!* éditée par R. Gentleman, K. Hornik et G.G. Parmigiani. Springer. 258 p.
- Vincent, L.A., X. Zhang, É. Mekis, H. Wan et E.J. Bush, 2018. *Changes in Canada's climate: Trends in indices based on daily temperature and precipitation data*. *Atmos.-Ocean* 56(5): 332-349. <https://doi.org/10.1080/07055900.2018.1514579>
- Wang, G.G., 2000. *Use of understory vegetation in classifying soil moisture and nutrient regimes*. *For. Ecol. Manage.* 129(1): 93-100. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00142-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00142-5)

La Direction de la recherche forestière a pour mandat de participer activement à l'orientation de la recherche et à l'amélioration de la pratique forestière au Québec, dans un contexte d'aménagement forestier durable, en réalisant des travaux de recherche scientifique appliquée. Elle développe de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou leur intégration au domaine de la pratique. Elle subventionne aussi des recherches en milieu universitaire, le plus souvent dans des créneaux complémentaires à ses propres travaux.

On peut citer ce texte en indiquant la référence.

Citation recommandée :

Ouimet, R., L. Duchesne et J.-D. Moore, 2023. *Influence du climat et des facteurs édaphiques sur la fertilité des sols dans la région écologique du Massif du lac Jacques-Cartier*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 160, 14 p.

ISSN 0834-4833

ISBN (PDF): 978-2-550-95993-9

G.F.D.C.: 113 114.52

L.C.: SD 390.3

Dépôt légal 2023

Bibliothèque nationale du Québec

© 2023 Gouvernement du Québec

**Ressources naturelles
et Forêts**

Québec 