



Prédire la croissance potentielle des arbres au Québec à l'aide des caractéristiques cartographiables des peuplements et des stations

par Catherine Périé, Louis Duchesne et Marie-Claude Lambert

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 164

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

Prédire la croissance potentielle des arbres au Québec à l'aide des caractéristiques cartographiables des peuplements et des stations

par Catherine Périé, biol., *Ph. D.*, Louis Duchesne, ing.f., M. Sc.
et Marie-Claude Lambert, stat., M. Sc.

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N° 164

DIRECTION DE LA RECHERCHE FORESTIÈRE

Mandat de la DRF

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 acquiert 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.

Les mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par un comité *ad hoc* formé d'au moins trois experts indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou d'une expérience. Ce document à tirage limité est également disponible dans notre site Internet en format pdf.

Vous pouvez adresser vos demandes à :

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, Québec (Québec)
Canada, G1P 3W8
Courriel : recherche.forestiery@mrnf.gouv.qc.ca
Internet : www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche

© Gouvernement du Québec

On peut citer ce texte en indiquant la référence.

Toutes les publications produites par la Direction de la recherche forestière, du ministère des Ressources naturelles et de la Faune, sont protégées par les dispositions de la Loi sur le droit d'auteur, les lois, les politiques et les règlements du Canada, ainsi que par des accords internationaux. Il est interdit de reproduire, même partiellement, ces publications sans l'obtention préalable d'une permission écrite.

ISSN : 1183-3912

ISBN : 978-2-550-64674-7

ISBN (PDF) : 978-2-550-64675-4

F.D.C. SD 387.S53

L.C. 181.1

Notes biographiques



Catherine Périé a obtenu une maîtrise en physiologie végétale à l'Université Paul Sabatier (Toulouse, France) en 1993. Elle a poursuivi ses études à l'École Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse (France) où, en 1994, elle a obtenu un diplôme d'études supérieures approfondies. En 2003, l'Université Laval lui décernait un doc-

torat en sciences forestières. Depuis 2001, elle est à l'emploi de la Direction de la recherche forestière à titre de chercheuse. Ses travaux de recherche portent sur l'étude de l'impact des perturbations d'origine anthropique ou naturelle sur les écosystèmes forestiers du Québec. Ces dernières années, elle s'intéresse plus particulièrement à l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la répartition des arbres au Québec.



Louis Duchesne est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval depuis 1995. En 1999, le même établissement lui décernait le diplôme de maître ès sciences. Depuis 1995, il est à l'emploi de la Direction de la recherche forestière à titre de chercheur. Il travaille au sein de l'équipe de recherche sur les écosystèmes et l'environnement forestiers.



Marie-Claude Lambert est statisticienne, diplômée de l'Université Laval depuis 1996. En 1998, le même établissement lui décernait un diplôme de maîtrise ès sciences. Depuis 2006, elle est à l'emploi de la Direction de la recherche forestière, au sein de l'équipe de biométrie.

Remerciements

Ce travail est le résultat du projet 112310095 de la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF).

Les auteurs tiennent à remercier MM. Jean-Pierre Saucier et Nelson Thiffault de la Direction de la recherche forestière ainsi que les trois évaluateurs anonymes pour leurs conseils et commentaires sur une version préliminaire de cet ouvrage.

La Direction des inventaires forestiers du MRNF a fourni les données nécessaires à l'étalonnage et l'évaluation des modèles. Les données de défoliation de la tordeuse des bourgeons de l'épinette ont été mises à

notre disposition par la Direction de l'environnement et de la protection des forêts du MRNF. L'estimation des variables climatiques a été effectuée à l'aide du logiciel BioSIM mis au point par le Service canadien des forêts.

Les auteurs tiennent également à remercier l'équipe de la Direction de la recherche forestière qui a participé à l'ensemble des étapes de la production de ce mémoire : M. Jean Noël (géomatique et base de données), Mmes Brigitte Boudreault, Sylvie Bourassa, Maripierre Jalbert et Véronique Poirier (graphisme et mise en page) et Mme Denise Tousignant (révision linguistique et édition du document final).

Résumé

La capacité d'une station à produire du bois dépend de multiples facteurs biogéoclimatiques, parmi lesquels on trouve les facteurs climatiques, topographiques et édaphiques. Ceux-ci influencent, de façon directe ou indirecte, la croissance des arbres. La présente étude modélise, à l'aide de données provenant pour la plupart du réseau des placettes permanentes du MRNF, l'effet des facteurs biogéoclimatiques sur la croissance potentielle en surface terrière des dix espèces d'arbres les mieux représentées au Québec, de même que celle de quatre groupes d'espèces moins abondantes. En détail, les variables dépendantes utilisées pour élaborer les modèles sont : le diamètre moyen quadratique des quatre arbres ayant présenté le plus fort accroissement, la surface terrière totale du peuplement, la densité du peuplement, l'indice de dommages de la dernière période épidémique de la tordeuse des bourgeons de l'épinette, l'altitude, la pente, la moyenne annuelle de la température maximale quotidienne, les précipitations totales annuelles, le type de dépôt de surface, son épaisseur ainsi que le régime hydrique des sols. Tous les modèles développés, à l'exception du groupe des autres résineux intolérants, ont une qualité d'ajustement jugée satisfaisante, avec des coefficients de détermination variant de 0,27 (peuplier faux-tremble) à 0,58 (groupe des autres feuillus intolérants). Les modèles présentent des biais moyens quasiment nuls et une racine carrée de l'erreur quadratique moyenne qui varie de 17 % (groupe des autres résineux tolérants) à 35 % (bouleau à papier, épinette noire et pin gris). Les variables retenues pour plus de la moitié des espèces ou groupes d'espèces modélisés sont le

diamètre moyen quadratique des tiges, la surface terrière totale du peuplement, le régime hydrique du sol, la température maximale annuelle, les précipitations totales annuelles et l'indice de dommages de la dernière période épidémique de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Cependant, selon les espèces, force est de constater que plus de 40 % de la variance de la croissance potentielle n'est expliquée par aucun de ces facteurs. Il en existe donc d'autres qui, seuls ou en combinaison, expliquent les différences de croissance d'une espèce donnée en un lieu ou un autre. L'identification de ces facteurs permettrait d'améliorer la qualité prédictive des modèles de croissance et de mieux cibler les sites les plus favorables à la croissance de chaque espèce ou groupes d'espèces.

Ces modèles de croissance potentielle ont été adaptés pour être utilisés dans le cadre de l'exercice ministériel d'identification des aires d'intensification de production ligneuse (AIPL), notamment dans les peuplements de structure inéquienne, où la notion d'IQS, définie par une hauteur donnée à 50 ans, ne s'applique pas.

Par ailleurs, ces modèles permettront également de préciser le potentiel sylvicole de chaque station forestière pour une espèce donnée. Dès lors, les aménagistes pourront proposer des traitements sylvicoles mieux adaptés aux capacités intrinsèques de croissance des sites sur lesquels poussent ces espèces, et préciser les hypothèses de rendement formulées dans le cadre du calcul stratégique qui vise à déterminer la possibilité annuelle de coupe.

Mots clés : accroissement en surface terrière, modèles mixtes, variables édaphiques, variables climatiques, croissance.

Abstract

A forest station's capacity to produce wood depends on several biogeoclimatic factors related to climate, topography and soil conditions. All of these can directly or indirectly influence tree growth. This study uses data obtained mainly from the MRNF's permanent plot network to model the effects of biogeoclimatic factors on potential growth in terms of basal area, for the ten main tree species in Québec and for four groups of less abundant species. More specifically, the dependent variables used in the models include mean quadratic diameter of the four trees having shown the largest growth increment, total stand basal area, stand density, damage index of the last spruce budworm epidemic episode, altitude, slope, annual mean of the maximum daily temperature, total annual precipitation, type and thickness of surface deposits, and soil moisture regime. Except for shade-intolerant softwoods, all the developed models have a satisfactory goodness of fit, with coefficients of determination ranging from 0.27 (quaking aspen) to 0.58 (other shade-intolerant hardwoods). Models' average bias values are close to zero, and their root mean square errors range from 17% (other shade-tolerant softwoods) to 35% (paper birch, black spruce and jack pine). For more than half of the studied species or groups of species, the variables retained in the models are mean quadratic diameter as defined above, total stand basal area, soil moisture regime,

annual mean of the maximum daily temperature, total annual precipitation and the damage index of the last spruce budworm epidemic episode. However, depending on species, more than 40% of the potential growth variance remains unexplained by these factors. Other factors than those used in this study, alone or in combination, are thus needed to explain a species' growth variations over a range of sites. Their identification would improve the predictive quality of the growth models, and enable forest managers to target the most favorable sites for the growth of each species or group of species.

These potential growth models have been adapted for use during the provincial government's exercise aimed at targeting areas for intensified wood production, particularly in the case of uneven-aged stands, in which the notion of site index, defined by tree height at 50 years, does not apply.

The knowledge of the environmental characteristics governing each species' growth allows the definition of each forest station's specific silvicultural potential. This will enable forest managers to choose the silvicultural treatments which are best adapted to a site's growth capacity for each species, and to specify management hypotheses relative to strategic allowable cut calculations.

Keywords : basal area increment, mixed models, edaphic variables, climatic variables, growth.

Table des matières

Résumé	v
Abstract	vi
Liste des tableaux et annexes	ix
Liste des figures	xi
Introduction	1
Chapitre premier - Matériel et méthodes	3
1.1 Données utilisées	3
1.1.1 Accroissement des tiges et variables de peuplements.....	3
1.1.2 Indice d'impact de la dernière période épidémique de la tordeuse des bourgeons de l'épinette	5
1.1.3 Données édaphiques	5
1.1.4 Données climatiques.....	5
1.2 Analyses statistiques	8
1.2.1 Analyses de régression.....	8
1.2.1.1 Première étape : Scission de la base de données originale.....	8
1.2.1.2 Deuxième étape : Sélection des variables explicatives.....	8
1.2.1.3 Troisième étape : Évaluation de la performance des modèles.....	10
1.2.1.4 Quatrième étape : Étalonnage des modèles finaux	10

Chapitre deux - Résultats	11
2.1 Description des données de peuplement	11
2.2 Sélection des variables explicatives	11
2.2.1 Évaluation de la performance des modèles	11
2.2.2 Étalonnage des modèles finaux	18
2.2.3 Modèles par espèce ou groupe d'espèces	18
2.2.3.1 Le bouleau jaune	20
2.2.3.2 Le bouleau à papier	21
2.2.3.3 L'épinette blanche	22
2.2.3.4 L'épinette noire	23
2.2.3.5 L'érable rouge	24
2.2.3.6 L'érable à sucre	25
2.2.3.7 Le groupe des autres feuillus intolérants	26
2.2.3.8 Le groupe des autres feuillus tolérants	27
2.2.3.9 Le peuplier faux-tremble	28
2.2.3.10 Le pin gris	29
2.2.3.11 Le groupe des autres résineux intolérants	29
2.2.3.12 Le groupe des autres résineux tolérants	30
2.2.3.13 Le sapin baumier	31
2.2.3.14 Le thuya occidental	32
Chapitre trois - Discussion	33
3.1 Qualité des modèles	33
3.2 Effets des caractéristiques biogéoclimatiques	33
3.2.1 Caractéristiques initiales des peuplements	33
3.2.2 Impact de la dernière épidémie de TBE	33
3.2.3 Facteurs édaphiques	34
3.2.4 Facteurs climatiques	34
3.2.5 Autres facteurs pouvant expliquer les variations de croissance	35
Conclusion	37
Références bibliographiques	39

Liste des tableaux et annexes

Tableau 1. Liste des dix principales espèces étudiées	3
Tableau 2. Composition des quatre groupes d'espèces étudiés	4
Tableau 3. Composition des classes-synthèses en fonction des types et de l'épaisseur du dépôt de surface ainsi que du régime hydrique	7
Tableau 4. Matrice de corrélation (coefficients de Pearson) des 6 variables climatiques et de l'altitude	9
Tableau 5. Résultats de l'analyse de groupement des variables les plus étroitement corrélées, pour 6 variables climatiques et l'altitude	9
Tableau 6. Nombre de modèles différents, fréquence du modèle le plus courant et fréquence des variables sélectionnées pour chaque espèce ou groupe d'espèces	16
Tableau 7. Mesures d'évaluation de la performance des modèles sur l'échelle logarithmique	17
Tableau 8. Caractéristiques des peuplements de référence (c'est-à-dire les peuplements les plus communs)	19
Annexe 1. Estimés des paramètres des modèles d'accroissement en surface terrière de chaque espèce ou groupe d'espèces.....	43

Liste des figures

Figure 1	Nombre de placettes-mesures par sous-domaine écologique utilisées lors de la modélisation du potentiel de croissance de chaque espèce ou groupe d'espèces	6
Figure 2.	Représentation sous forme de boîtes à moustaches (<i>boxplot</i> en anglais) de la distribution des valeurs de chaque variable continue utilisée pour prédire la croissance potentielle de chaque espèce ou groupe d'espèces	12
Figure 3.	Fréquence de chaque type de dépôt de surface pour chaque espèce ou groupe d'espèces	13
Figure 4.	Fréquence de chaque classe d'épaisseur de dépôt de surface pour chaque espèce ou groupe d'espèces	14
Figure 5.	Fréquence de chaque classe de régime hydrique pour chaque espèce ou groupe d'espèces	15
Figure 6.	Fréquence relative de la présence des variables associées aux caractéristiques de peuplement, édaphiques et climatiques dans les 14 modèles de prédiction de la croissance potentielle	17
Figure 7.	Dendrogramme (a) et projection dans l'espace des métriques utilisées pour évaluer la performance des modèles de prédiction de la croissance potentielle des cinq groupements (b).....	18
Figure 8.	Influence du diamètre moyen quadratique initial des arbres (a) et de la surface terrière totale initiale des peuplements (b) sur les prévisions de la croissance potentielle des espèces ou groupes d'espèces.....	19
Figure 9.	Prévision de la croissance potentielle du bouleau jaune (BOJ) en fonction de la température maximale annuelle (a), des précipitations totales annuelles (b), de l'indice de dommages de la TBE (c) et du régime hydrique des sols (d)	20
Figure 10.	Prévision de la croissance potentielle du bouleau à papier (BOP) en fonction de la température maximale annuelle (a), de l'indice de dommages de la TBE (b), du type de dépôt de surface (c) et du régime hydrique des sols (d)	21
Figure 11.	Prévision de la croissance potentielle de l'épinette blanche (EPB) en fonction de l'indice de dommages de la TBE (a) et de l'épaisseur du dépôt de surface (b).....	22
Figure 12.	Prévision de la croissance potentielle de l'épinette noire (EPN) en fonction de la température maximale annuelle (a), des précipitations totales annuelles (b), de l'indice de dommages de la TBE (c), du type de dépôt de surface (d) et du régime hydrique des sols (e).....	23

Figure 13. Prévion de la croissance potentielle de l'érable rouge (ERR) en fonction de la température maximale annuelle (a), des précipitations totales annuelles (b), de l'épaisseur du dépôt de surface (c) et du régime hydrique des sols (d)	24
Figure 14. Prévion de la croissance potentielle de l'érable à sucre (ERS) en fonction des précipitations totales annuelles (a) et de l'indice de dommages de la TBE (b)	25
Figure 15. Prévion de la croissance potentielle du groupe des autres feuillus intolérants (AFi) en fonction de la température maximale annuelle (a) et du type de dépôt de surface (b)	26
Figure 16. Prévion de la croissance potentielle du groupe des autres feuillus tolérants (AFt) en fonction du type de dépôt de surface (a), de son épaisseur (b) et du régime hydrique des sols (c).....	27
Figure 17. Prévion de la croissance potentielle du peuplier faux-tremble (PET) en fonction de la température maximale annuelle (a), des précipitations totales annuelles (b), du type de dépôt de surface (c), de son épaisseur (d) et du régime hydrique des sols (e)	28
Figure 18. Prévion de la croissance potentielle du pin gris (PIG) en fonction de la température maximale annuelle (a) et du régime hydrique des sols (b)	29
Figure 19. Prévion de la croissance potentielle du groupe des autres résineux tolérants (ARt) en fonction des précipitations totales annuelles (a) et de l'indice de dommages de la TBE (b)	30
Figure 20. Prévion de la croissance potentielle du sapin baumier (SAB) en fonction de la température maximale annuelle (a), des précipitations totales annuelles (b), de l'indice de dommages de la TBE (c) du type de dépôt de surface (d) et du régime hydrique des sols (e).....	31
Figure 21. Prévion de la croissance potentielle du thuya occidental (THO) en fonction du régime hydrique des sols.....	32

Introduction

La Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier (L.R.Q., c. A-18.1, sanctionnée le 1^{er} avril 2010) modifie en profondeur le régime forestier québécois. Dorénavant, le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) devient responsable de l'aménagement durable et de la gestion des forêts du domaine de l'État. Ceci implique qu'à partir de 2013, il devra réaliser la planification forestière, les interventions en forêt, leur suivi et leur contrôle, ainsi que le mesurage des bois. La loi mentionne aussi qu'à partir de 2013, certaines portions du territoire reconnues comme ayant un fort potentiel forestier seront dédiées à l'intensification de la production ligneuse (chapitre II, A-36 et A-37). La détermination des critères permettant d'identifier ces aires à fort potentiel forestier est sous la responsabilité du Ministre.

Une bonne connaissance de la capacité de chaque station à produire du bois est essentielle pour le calcul réaliste de la possibilité forestière, ainsi que pour l'élaboration d'une planification tactique optimale des opérations forestières en fonction de chaque secteur d'intervention. Pour une même station, définie par ses propres caractéristiques environnementales, cette capacité diffère d'une espèce ligneuse à l'autre. Une telle connaissance permet, entre autres, de mieux définir les hypothèses de rendement qui servent à déterminer la possibilité forestière, ainsi que les espèces à privilégier pour accroître la quantité de bois produite. Elle permet également d'orienter les efforts d'aménagement sur les sites ayant le meilleur potentiel forestier, afin de maximiser le retour sur l'investissement : investir là où les chances de réussite sont optimales.

La capacité d'une station à produire du bois dépend de multiples facteurs biogéoclimatiques. Plusieurs variables climatiques, topographiques et édaphiques influencent, de façon directe ou indirecte, la croissance des arbres (ZON 1913, CAJANDER 1926, HÄGGLUND 1981). Depuis longtemps, les forestiers utilisent l'indice de qualité de station (IQS, défini comme la hauteur des arbres dominants et codominants à un âge de référence donné) pour quantifier le potentiel de croissance des peuplements forestiers. Cette mesure intègre l'influence des facteurs de station (climat, dépôt de surface, drainage, pente, etc.) et celle des facteurs génétiques qui régissent la croissance d'une espèce dans un milieu donné (PERRON *et al.* 2009). En effet, de nombreuses études ont démontré qu'il existait une relation entre l'IQS et les facteurs biogéoclimatiques qui définissent le potentiel d'une station pour produire du bois (STAGE 1973, WANG 1995, WANG et KLINKA 1996, CHEN *et al.* 2002, MONSERUD *et al.* 2008).

Historiquement, le concept d'IQS a été développé pour être appliqué à des peuplements monospécifiques, dont la dynamique de régénération est soumise à des perturbations majeures telles que les feux, les épidémies d'insectes sévères, les chablis sévères ou les coupes totales. En effet, pour ce type de peuplement de structure équiennne, l'âge des arbres dominants et codominants utilisé pour quantifier l'IQS correspond généralement à celui du peuplement. Cependant, le concept d'IQS ne s'applique pas à des peuplements composés d'espèces tolérantes à l'ombre, et dont le renouvellement naturel est principalement lié à des perturbations partielles ou à l'apparition de petites trouées causées par la chute d'arbres. Dans ces peuplements de structure inéquienne, les arbres dominants et codominants ont des âges variés qui ne correspondent pas nécessairement à l'âge du peuplement (MONSERUD 1984, POKHAREL et FROESE 2009). Ces peuplements nécessitent un aménagement forestier distinct de celui des peuplements forestiers de structure équiennne.

Au Québec, l'approche sylvicole privilégiée pour les peuplements de structure inéquienne est le jardinage par pied d'arbre. Ce traitement consiste à récolter les arbres individuellement dans toutes les classes de diamètre, plus ou moins uniformément dans l'ensemble du peuplement, afin de stimuler la croissance des tiges résiduelles et de libérer de l'espace pour la régénération. Les hypothèses de rendement ligneux à la base de ce traitement sylvicole stipulent que le volume marchand des peuplements jardinés se reconstitue au cours d'une rotation de 20 ans (± 5 ans), à la suite d'un prélèvement de 25 à 35 % de la surface terrière initiale du peuplement. Cependant, dans les faits, les peuplements ne réagissent pas tous de la même manière au traitement, même s'ils présentaient tous les caractéristiques dendrométriques adéquates pour ce traitement au moment où la prescription sylvicole a été faite (BÉDARD *et al.* 2004, GUILLEMETTE *et al.* 2009).

La COMMISSION D'ÉTUDE SUR LA GESTION DE LA FORÊT PUBLIQUE QUÉBÉCOISE (2004) (mieux connue sous le nom de Commission Coulombe) soulignait qu'il existe une forte discordance entre les hypothèses utilisées lors de la prévision de la possibilité forestière des peuplements de structure inéquienne et la réalité terrain. Suite à ce constat, les commissaires ont recommandé de remplacer le modèle de croissance Sylva II « module par taux de passage » utilisé pour calculer cette possibilité forestière par d'autres modèles de croissance. Sylva II utilisait les variables explicatives suivantes : l'espèce, la zone d'accroissement,

le diamètre, la qualité des tiges, le type de couvert, la densité du peuplement et les perturbations. Force est de constater que la composante « facteurs environnementaux », qui permettrait de reconnaître une certaine qualité de station, n'était pas prise en compte par ce modèle, alors qu'elle aurait pu expliquer en partie pourquoi certains peuplements réagissaient mieux que d'autres à un même traitement sylvicole.

En réponse à la recommandation de la Commission Coulombe, les modèles de croissance utilisés pour le calcul de la possibilité forestière ont été remplacés par une série de nouveaux modèles : ARTÉMIS-2009 (FORTIN et LANGEVIN 2010), NATURA-2009 (POTHIER et AUGER 2011) et SUCCES-2009 (AUGER *et al.* 2011). ARTÉMIS-2009 est le nouveau modèle provincial de croissance basé sur une approche par tiges individuelles. Il intègre maintenant une composante « facteurs environnementaux » caractérisée par la température moyenne annuelle, les précipitations totales annuelles et la végétation potentielle. En ce sens, ce nouvel outil constitue une avancée majeure pour la planification de l'aménagement forestier et le calcul de la possibilité forestière au Québec.

Toutefois, bien que très utile dans un contexte d'évaluation de l'état futur des peuplements, ARTÉMIS-2009 ne permet pas de distinguer spécifiquement les caractéristiques physiques qui régissent la croissance des espèces commerciales au Québec. Les différences de qualité de station qui ne sont pas reflétées dans la végétation potentielle ou par le

climat ne sont toujours pas prises en considération dans ARTÉMIS-2009, contrairement à d'autres modèles récemment développés ailleurs (LAUBHANN *et al.* 2009, KANTAVICHAI *et al.* 2010).

Cette étude vise donc à poursuivre le travail en identifiant les caractéristiques climatiques, édaphiques, écologiques et topographiques qui, associées aux caractéristiques dendrométriques des peuplements, régissent la croissance des espèces commerciales de la forêt du Québec méridional. Son objectif principal consiste donc à modéliser l'accroissement potentiel des tiges, en considérant à la fois les caractéristiques dendrométriques des peuplements et les caractéristiques biogéoclimatiques cartographiables¹ des sites sur lesquels ces peuplements croissent et ce, afin :

1. d'évaluer l'effet des caractéristiques biogéoclimatiques sur le potentiel de croissance des espèces commerciales du Québec;
2. d'étalonner les modèles qui permettront de cartographier, à l'échelle du polygone écoforestier, le potentiel de croissance de chacune des espèces commerciales;
3. de proposer les variables environnementales les plus significatives à ajouter aux modèles utilisés, pour prédire le potentiel de croissance des espèces commerciales avec une meilleure précision.

¹ Seules les variables photo-interprétables (topographie, sols) ou modélisables (climat, indice de dommages de la TBE) à l'échelle de la province sont prises en compte dans l'élaboration des modèles, pour permettre d'évaluer le potentiel de croissance de chaque polygone forestier de la forêt du Québec.

Chapitre premier

Matériel et méthodes

1.1 Données utilisées

1.1.1 Accroissement des tiges et variables de peuplements

La croissance en surface terrière a été étudiée sur une base individuelle, pour les dix espèces les mieux représentées dans la forêt publique sous aménagement du Québec méridional, lors de la troisième campagne d'inventaire décennal (1990-2002). Le tableau 1 présente la liste des espèces, accompagnée de leur nom latin et de leur code. Celles-ci représentent 95 % du volume marchand total. Les autres espèces ont été regroupées en quatre groupes : autres feuillus intolérants (AFi), autres feuillus tolérants (AFt), autres résineux intolérants (ARi) et autres résineux tolérants (ARt); la composition des groupes et la représentativité des espèces à l'intérieur de chaque groupe est détaillée dans le tableau 2.

Les données sur la végétation proviennent de la base de données du réseau de placettes-échantillons permanentes du ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Les arbres d'espèces commerciales qui ont été sélectionnés devaient avoir un diamètre à hauteur de poitrine (dhp) d'au moins 9,1 cm, être vivants lors d'au moins deux mesurages consécutifs, occuper une position de dominants (excluant les vétérans¹) ou codominants et avoir été mesurés au même endroit sur le tronc.

L'accroissement annuel en surface terrière (équation 1) de chaque arbre retenu a été calculé comme suit :

$$\delta g = \frac{\pi * (dhp_{fin}^2 - dhp_{ini}^2)}{4 * temps} \quad [1]$$

où

δg correspond à l'accroissement en surface terrière (cm² an⁻¹),

dhp_{fin} est le dhp final (cm),

dhp_{ini} est le dhp initial (cm),

ini et fin sont les deux bornes de la période, et

$temps$ représente le temps² (années) écoulé entre deux mesurages consécutifs.

Les accroissements en surface terrière négatifs ont été conservés, dans la mesure où ils n'étaient pas considérés extrêmes (diminution du diamètre entre deux mesures consécutives de moins de 6 mm).

Tableau 1. Liste des dix principales espèces étudiées

Code de l'espèce	Nom français de l'espèce	Nom latin de l'espèce	% du volume marchand (MRNF 2009)
BOJ	Bouleau jaune	<i>Betula alleghaniensis</i> Britton	4,9
BOP	Bouleau à papier	<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	11,2
EPB	Épinette blanche	<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	4,1
EPN	Épinette noire	<i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.	38,1
ERS	Érable à sucre	<i>Acer saccharum</i> Marsh.	4,4
ERR	Érable rouge	<i>Acer rubrum</i> L.	2,0
PET	Peuplier faux-tremble	<i>Populus tremuloides</i> Michx.	7,2
PIG	Pin gris	<i>Pinus banksiana</i> Lamb.	6,7
SAB	Sapin baumier	<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	13,8
THO	Thuya occidental	<i>Thuya occidentalis</i> L.	2,1

¹ Les vétérans se définissent comme étant des survivants d'un peuplement disparu, et dont l'allure suggère un âge nettement supérieur à celui du peuplement actuel.

² Les fractions d'années de croissance ont été prises en compte dans le calcul.

Tableau 2. Composition des quatre groupes d'espèces étudiés

Nom et code du groupe d'espèces	Nom français des espèces composant le groupe	Nom latin des espèces composant le groupe	Représentativité ¹ de l'espèce au sein de chaque groupe (%)
Autres feuillus intolérants (AFi)	Peuplier à grandes dents	<i>Populus grandidentata</i> Michx.	28,4
	Chêne rouge	<i>Quercus rubra</i> L.	23,3
	Cerisier de Pennsylvanie	<i>Prunus pensylvanica</i> L. f.	22,4
	Peuplier baumier	<i>Populus balsamifera</i> L.	7,8
	Saules	<i>Salix</i> sp.	6,7
	Bouleau gris	<i>Betula populifolia</i> Marsh.	6,5
	Cerisier tardif	<i>Prunus serotina</i> Ehrhart	2,8
	Érable argenté	<i>Acer saccharinum</i> L.	1,8
	Caryer cordiforme	<i>Carya cordiformis</i> (Wangenh.) K. Koch	0,1
	Peuplier à feuilles deltoïdes	<i>Populus deltoides</i> Bartram	0,1
	Noyer cendré	<i>Juglans cinerea</i> L.	0,0
Autres feuillus tolérants (AFt)	Hêtre à grandes feuilles	<i>Fagus grandifolia</i> Ehrhart	43,0
	Frêne noir	<i>Fraxinus nigra</i> Marsh.	15,4
	Ostryer de Virginie	<i>Ostrya virginiana</i> (Miller) K. Koch	13,5
	Tilleul d'Amérique	<i>Tilia americana</i> L.	10,9
	Sorbier d'Amérique	<i>Sorbus americana</i> Marsh.	5,5
	Frêne d'Amérique	<i>Fraxinus americana</i> L.	5,2
	Érable de Pennsylvanie	<i>Acer pensylvanicum</i> L.	2,8
	Orme d'Amérique	<i>Ulmus americana</i> L.	2,2
	Chêne blanc	<i>Quercus alba</i> L.	0,5
	Frêne de Pennsylvanie	<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marsh.	0,4
	Sorbier des montagnes	<i>Sorbus decora</i> (Sarg.) C.K. Schneider	0,3
	Chêne à gros fruits	<i>Quercus macrocarpa</i> Michx.	0,2
	Chêne bicolore	<i>Quercus bicolor</i> Willd.	0,0
	Charme de Caroline	<i>Carpinus caroliniana</i> Walt.	0,0
	Orme rouge	<i>Ulmus rubra</i> Muhl.	0,0
	Orme de Thomas	<i>Ulmus thomasi</i> Sarg.	0,0
Autres résineux intolérants (ARi)	Mélèze laricin	<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K. Koch	70,0
	Pin rouge	<i>Pinus resinosa</i> Solander ex Aiton	28,1
	Pin sylvestre	<i>Pinus sylvestris</i> L.	1,9
Autres résineux tolérants (ARt)	Épinette rouge	<i>Picea rubens</i> Sarg.	38,6
	Pruche du Canada	<i>Tsuga canadensis</i> (L.) Carr.	31,2
	Pin blanc	<i>Pinus strobus</i> L.	29,1
	Épinette de Norvège	<i>Picea abies</i> (L.) H. Karsten	1,1

¹ Proportion du nombre de tiges.

Pour chaque période entre deux mesurages consécutifs de chaque placette d'inventaire, la croissance de chaque espèce ou groupes d'espèces a été calculée comme étant la moyenne des quatre meilleurs accroissements des tiges individuelles de l'espèce. Cela a permis de définir une croissance potentielle, tout en réduisant la variance associée au statut social des arbres au sein du peuplement, à des défauts de formation, aux impacts des épidémies d'insectes ou des maladies, ou encore, à la variabilité génétique qui existe naturellement entre les individus. Pour une espèce donnée, s'il n'y avait pas au moins quatre arbres dans la placette (équivalant à 100 tiges ha⁻¹), aucun potentiel de croissance n'a été calculé. La figure 1 indique, pour chaque espèce ou groupes d'espèces, le nombre de placettes-mesures utilisées dans les analyses subséquentes.

Pour chaque inventaire, la surface terrière totale de la placette a été calculée et se définit par la somme de la surface terrière (G) des arbres dont le dhp est supérieur à 1,1 cm. Elle s'exprime en m² ha⁻¹.

Le diamètre moyen quadratique initial (dq_i) des quatre arbres d'une même espèce ayant eu le meilleur accroissement en surface terrière pendant la période sélectionnée a également été calculé pour chacune des placettes.

1.1.2 Indice d'impact de la dernière période épidémique de la tordeuse des bourgeons de l'épinette

Par ses défoliations répétées en période épidémique, la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) (*Choristoneura fumiferana* [Clemens]) peut induire des réductions de croissance en diamètre et de la mortalité chez le sapin baumier, les épinettes et le mélèze (ROSE et LINDQUIST 1977). En plus des effets directs sur les espèces hôtes, ces périodes épidémiques peuvent favoriser la croissance des espèces compagnes, qui profitent alors de l'ouverture du couvert provoquée par les défoliations successives (DUCHESNE et OUMET 2008). Il est important de quantifier ces impacts, puisque la dernière épidémie de TBE, qui a sévi dans la province de 1967 à 1992¹, coïncide avec la première période de croissance captée par les nombreuses placettes-échantillons permanentes établies au cours des années 1970. Une approche consiste à estimer les impacts de la TBE pendant les périodes épidémiques, de façon à les intégrer dans la modélisation de la croissance. Pour ce faire, nous avons utilisé une équation permettant de prévoir les baisses de croissance en diamètre du sapin, à partir des relevés

annuels de défoliation causée par les insectes, consignés par le MRNF pour tout le territoire québécois. Cette équation a été utilisée pour définir, pour chaque placette, un indice des dommages causés par la TBE (rwri : *ring width reduction index*; POTHIER *et al.* 2005, POTHIER et MAILLY 2006). Cet indice reflète le nombre moyen d'années avec des défoliations sévères par décennie (POTHIER et AUGER 2011).

1.1.3 Données édaphiques

Afin de maximiser l'utilité des modèles à l'échelle de la planification forestière, seules les caractéristiques édaphiques qui définissent les polygones écoforestiers ont été considérées. Le type et l'épaisseur du dépôt de surface provenaient de la carte écoforestière (SIEF²; cartographie mise à jour en 2003). La classe de drainage (régime hydrique) attribuée à chaque placette était celle observée lors des mesurages. Des regroupements, basés notamment sur la nature des dépôts, leur texture et leur représentativité, ont été effectués afin de diminuer le nombre de paramètres à estimer, mais surtout, afin d'avoir un nombre suffisant de placettes pour chaque type de station (Tableau 3).

1.1.4 Données climatiques

Les conditions climatiques moyennes de chaque placette ont été estimées à l'aide du logiciel générique BioSIM (version 8.3.8) développé par le Service canadien des forêts. Ces estimés sont établis à partir des données de température et de précipitations régionales interpolées à partir des quatre stations météorologiques avoisinantes, ajustées pour les différences d'élévation, d'exposition, de latitude et de longitude (RÉGNIERE et ST-AMANT 2006). Ainsi, pour chaque parcelle et pour chaque période écoulée entre deux mesurages consécutifs, les données climatiques suivantes ont été calculées :

- Somme des degrés-jours supérieurs à 0 °C (DJ0, °C);
- Température maximale annuelle (Tmax; °C), définie comme la moyenne annuelle des températures maximales quotidiennes;
- Température minimale annuelle (Tmin; °C) définie comme la moyenne annuelle des températures minimales quotidiennes;
- Précipitations totales annuelles (PrecTot; mm);
- Radiations totales annuelles (RadTot; MJ m⁻²);

¹ <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/fimaq/insectes/fimaq-insectes-insectes-tordeuse.jsp>

² <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-cartes-sief.jsp>

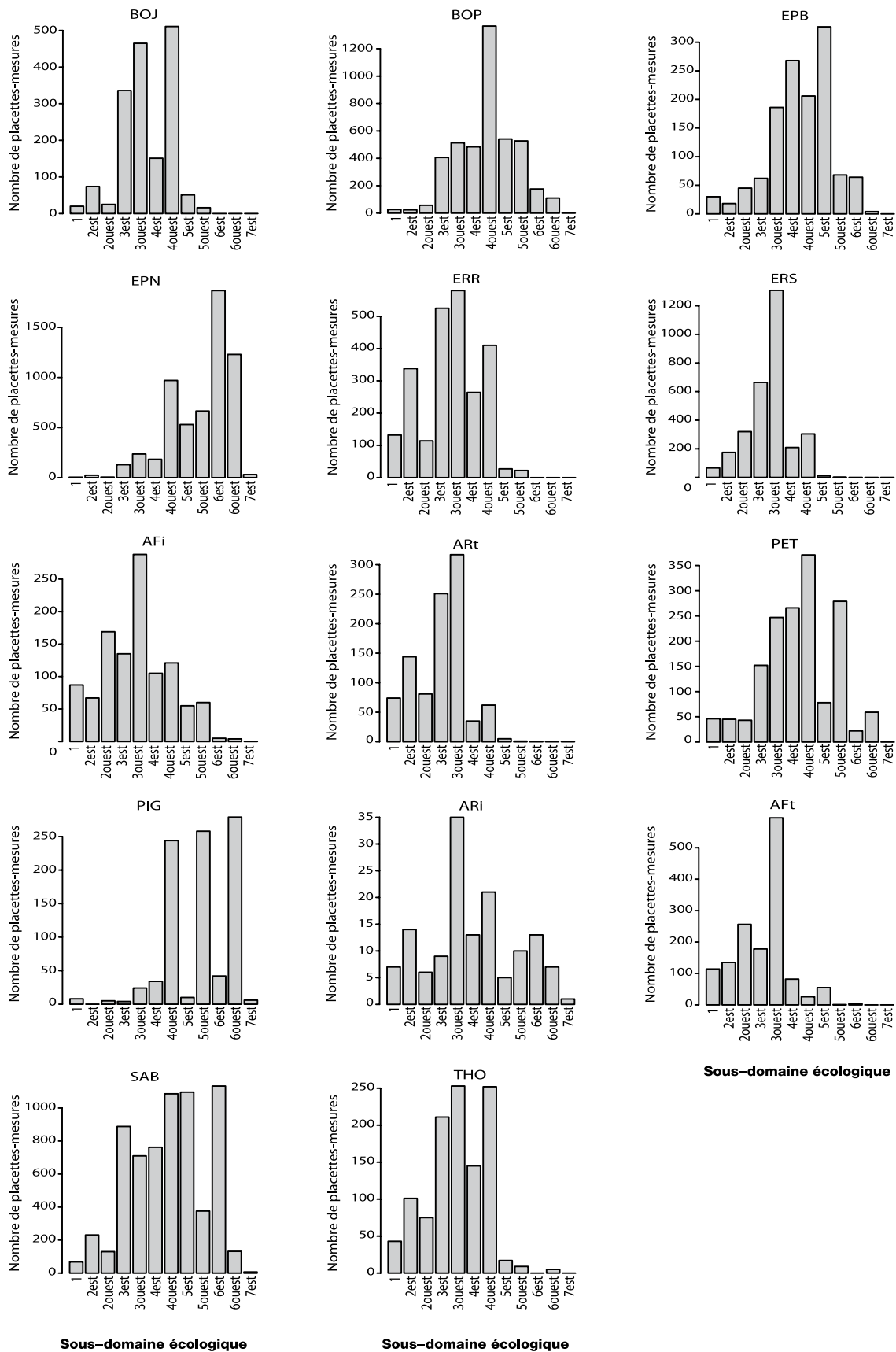


Figure 1. Nombre de placettes-mesures par sous-domaine écologique utilisées lors de la modélisation du potentiel de croissance de chaque espèce ou groupe d'espèces. Chaque placette a été mesurée de 2 à 4 fois. La légende des abréviations des noms d'espèces et de groupes d'espèces est présentée aux tableaux 1 et 2.

Tableau 3. Composition des classes-synthèses en fonction des types et de l'épaisseur du dépôt de surface ainsi que du régime hydrique. Des informations détaillées sur les codes de classes regroupées sont disponibles dans *Le point d'observation écologique* (MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES 1994)

Caractéristiques édaphiques		Classe synthèse	Classes regroupées
Type de dépôt (depotsurf)	Dépôts glaciaires	1A	1A, 1AM, 1AY, 1BD, 1BF, 1BN, 8A, 8AM, 8AY, 8C, 8CM, M1A
		1AA	1AA, 1AAM, 1AAY, 1BI, 4GA, 4GAY, 4GS, 4GSM, 4GSY, 8G
		1AB	1AB, 1BG, 1BP
		1AR	1AR, 8APY
	Dépôts fluvio-glaciaires	2	2A, 2AE, 2AK, 2AT, 2AY, 2BD, 2BE, 2BEM, 2BEY, 3AN
	Dépôts marins	5A	5A
	Dépôts littoraux marins	6S	5S, 5SY, 6S, 6SY, 9, 9S, M6S
	Dépôts organiques	7	7E, 7T, 7TM, 7TY, M7T
	Dépôts de pentes et d'altération	R	R, R1A, R1AA, R4GA, R5A, R5S, R6S, R7T, R8A
Épaisseur du dépôt (epaisdep)		absent à très mince	0 à 25 cm d'épaisseur modale
		très mince à mince	25 à 50 cm d'épaisseur modale
		mince à épais	plus de 50 cm d'épaisseur modale
Régime hydrique (reghyd)		Humide : drainage très mauvais à imparfait	4, 5, 6
		Mésique : drainage modéré	3
		Xérique : drainage bon à excessif	0, 1, 2

Comme plusieurs variables climatiques étaient fortement corrélées entre elles et avec l'altitude (Tableau 4), une analyse de groupement de variables a été réalisée à l'aide de la procédure VARCLUS du progiciel SAS. La partition obtenue est telle que les variables d'un même groupe sont étroitement corrélées entre elles, et que des variables de deux groupes différents le sont moins. Cette analyse a permis de classer les six variables climatiques et l'altitude en trois groupes distincts (Tableau 5). Les trois variables retenues pour représenter chacun des groupes sont la température maximale annuelle, l'altitude et les précipitations totales annuelles.

1.2 Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du progiciel d'analyses SAS 9.2 (SAS INSTITUTE 2000).

1.2.1 Analyses de régression

L'altitude, la température maximale annuelle, les précipitations totales annuelles, le diamètre moyen quadratique initial, soit celui calculé au début de chaque intervalle, la surface terrière totale initiale de la placette, soit celle calculée au début de chaque intervalle, la densité du couvert, le dépôt de surface, le régime hydrique, l'épaisseur du dépôt de surface et l'indice de dommages de la TBE sont les variables explicatives potentielles. Dans l'analyse, les effets simples et certaines interactions entre deux variables ont été considérés.

La démarche de modélisation de la croissance potentielle de chaque espèce ou groupe d'espèces s'est faite en quatre étapes.

1.2.1.1 Première étape : Scission de la base de données originale

Pour chaque espèce ou groupe d'espèces, le jeu de données initial a été partagé en deux, de façon aléatoire. Le premier jeu de données comprenait 70 % des données initiales et a servi à sélectionner les variables et à réaliser un étalonnage des modèles préliminaires. Le deuxième jeu de données comprenait 30 % des données initiales et a servi à évaluer la performance de ces modèles préliminaires.

1.2.1.2 Deuxième étape : Sélection des variables explicatives

Afin de respecter l'homogénéité de la variance et la normalité des résidus, la variable dépendante (accroissement potentiel en surface terrière) a été transformée à l'aide du logarithme népérien ($\ln$). Cette transformation biaise un peu les estimations obtenues lors du retour à l'échelle originale. En conséquence, une correction de biais a été utilisée (SNOWDON 1991).

La correction c (équations 2 et 3) correspond au rapport de la moyenne de l'accroissement en surface terrière ($\bar{y}$) sur la moyenne des accroissements retransformés ($e^{\hat{\ln y}}$) :

$$c = \frac{\bar{y}}{e^{\hat{\ln y}}} \quad [2]$$

$$\hat{y}_i = e^{\hat{\ln y}_i} * c \quad [3]$$

où

$\hat{\ln y}_i$ est la valeur prédite par le modèle sur l'échelle logarithmique, et

$\hat{y}_i$ est la valeur prédite retransformée et corrigée pour le biais.

La procédure GLMSELECT du progiciel SAS a été utilisée pour faire la sélection de variables. Pour chaque espèce ou groupe d'espèces et pour chaque placette de la base de données, une seule période entre deux mesurages consécutifs a été choisie aléatoirement, de façon à éliminer les corrélations entre les mesures répétées d'une même placette (ce qui arrive quand la placette a été mesurée à plusieurs reprises).

À son tour, le jeu de données servant à faire la sélection de variables a été scindé en deux. Le premier de ces jeux a servi à sélectionner les variables dans les modèles par la méthode dite « pas à pas ». Le critère pour déterminer l'ordre d'entrée et de sortie des variables était basé sur le maximum d'amélioration du R^2 ajusté (SELECT = ADJRSQ), tandis que le critère d'arrêt du processus de sélection était le niveau de signification des variables explicatives (STOP = SL). Les seuils d'entrée et de sortie des variables ont été fixés respectivement à 0,15 et 0,05. Le second jeu de données a servi à sélectionner le modèle dont l'erreur quadratique moyenne était la plus faible parmi les modèles obtenus à chaque étape de l'analyse « pas à pas ».

L'étape du choix des variables a été répétée 1000 fois, en sélectionnant aléatoirement un nouveau sous-ensemble de placettes parmi 70 % des données initiales (AUSTIN et TU 2004). Seules les variables et les interactions sélectionnées au moins 250 fois sur les 1000 ont été retenues pour l'étape suivante d'étalonnage préliminaire.

Tableau 4. Matrice de corrélation (coefficients de Pearson) des 6 variables climatiques et de l'altitude (Alt = altitude; DJ0 = somme annuelle des degrés-jours supérieurs à 0 °C; Tmax = moyenne annuelle des températures maximales; Tmin = moyenne annuelle des températures minimales; PrecTot = précipitations totales annuelles; RadTot = radiations totales annuelles; DPV = somme annuelle du déficit de pression de vapeur)

Variable	Alt	DJ0	Tmax	Tmin	PrecTot	RadTot	DPV
Alt	1,00000						
DJ0	-0,63814	1,00000					
Tmax	-0,58435	0,98036	1,00000				
Tmin	-0,68263	0,91040	0,92993	1,00000			
PrecTot	0,48695	-0,19660	-0,06343	0,00786	1,00000		
RadTot	0,60955	-0,01224	0,11725	-0,03618	0,71765	1,00000	
DPV	-0,47254	0,94503	0,93065	0,75539	-0,21634	0,15143	1,00000

Tableau 5. Résultats de l'analyse de groupement des variables les plus étroitement corrélées, pour 6 variables climatiques et l'altitude (DJ0 = somme annuelle des degrés-jours supérieurs à 0°C; Tmax = moyenne annuelle des températures maximales; Tmin = moyenne annuelle des températures minimales; DPV = somme du déficit annuel de pression de vapeur; PrecTot = précipitations totales annuelles; RadTot = radiations totales annuelles; Alt = altitude)

Groupe	Variable	R^2 avec		$\frac{1 - R^2}{1 - R^2_{voisin}}$
		Son propre groupe = R^2	Le groupe le plus proche = R^2_{voisin}	
Groupe 1	DJ0	0,9874	0,4072	0,0212
	Tmax	0,9899	0,3415	0,0153
	Tmin	0,8665	0,4660	0,2499
	DPV	0,8854	0,2233	0,1475
Groupe 2	Alt	1,0000	0,3789	0,0000
Groupe 3	PrecTot	0,8588	0,2371	0,1851
	RadTot	0,8588	0,3716	0,2246

1.2.1.3 Troisième étape : Évaluation de la performance des modèles

Plusieurs mesures ont été calculées en valeurs absolues et relatives, afin d'évaluer la qualité des modèles statistiques obtenus sur le jeu de données servant à l'évaluation de la performance des modèles (30 % des données initiales). D'abord, le coefficient de détermination (R^2 , équation 4) évalue la qualité d'ajustement des modèles. Ensuite, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne ($REQM$ et $REQM_{\%}$, équations 5 et 6) permet d'évaluer leur précision. Finalement, les statistiques $Biais$ (équation 7) et $Biais_{\%}$ (équation 8) permettent d'évaluer le biais d'estimation des modèles.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad [4]$$

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad [5]$$

$$REQM_{\%} = 100 * \frac{\sqrt{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / n-1}}{\sum y_i / n} \quad [6]$$

$$Biais = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad [7]$$

$$Biais_{\%} = 100 * \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i) / n}{\sum y_i / n} \quad [8]$$

où

y_i est la valeur observée de la placette i ,

$\hat{y}_i$ est la valeur prédite par le modèle de la placette i ,

$\bar{y}$ est la valeur moyenne des y_i , et

n est le nombre de placettes.

Après avoir standardisé les mesures d'évaluation (en fixant la moyenne à 0 et l'écart-type à 1), une analyse de groupement a permis de regrouper les espèces ayant des mesures de performance des modèles similaires. Le groupement a été fait en utilisant la procédure CLUSTER du progiciel SAS (méthode WARD).

1.2.1.4 Quatrième étape : Étalonnage des modèles finaux

Une fois la première sélection des variables effectuée, l'étalonnage des 14 modèles finaux a été fait sur l'ensemble des données. Pour tenir compte de la corrélation dans le temps de toutes les mesures d'une même placette, la procédure MIXED de SAS a été utilisée en spécifiant, à l'aide de l'énoncé REPEATED, une structure de covariance tenant compte des intervalles de temps inégaux entre les différentes mesures. Les tests sur les effets fixes ont été faits au seuil théorique de 5%.

Chapitre deux

Résultats

2.1 Description des données de peuplement

Les figures 2 à 5 illustrent, sous forme de boîtes à moustaches (*boxplot* en anglais) ou d'histogrammes de fréquences, les statistiques descriptives des variables utilisées lors de la modélisation de la croissance potentielle en surface terrière de chaque espèce ou groupe d'espèces.

En moyenne, le diamètre moyen quadratique initial des arbres sélectionnés (Figure 2a) varie de 15 cm (EPN) à 25 cm pour le groupe des autres résineux tolérants (ARt). Ces arbres appartiennent à des peuplements ayant une surface terrière totale (Figure 2b) qui varie en moyenne de 17 m² ha⁻¹ (PIG) à 26 m² ha⁻¹ (THO).

L'indice des dommages de la dernière épidémie de TBE (Figure 2c) varie en moyenne de 0,5, pour les placettes sélectionnées pour modéliser la croissance du PIG, à 0,8, pour celles modélisant la croissance du BOP ou de l'EPB.

L'altitude moyenne (Figure 2d) varie de 271 m, pour les placettes sélectionnées pour modéliser la croissance des ARt, à 411 m, pour celles modélisant la croissance de l'EPN. La température maximale annuelle (Figure 2e) varie en moyenne de 5,6 °C, pour les placettes sélectionnées pour l'EPN, à 9,3 °C, pour celles sélectionnées pour les ARt. Finalement, les précipitations totales annuelles (Figure 2f) varient en moyenne de 937 mm, pour les placettes sélectionnées pour modéliser la croissance du PIG, à 1047 mm, pour celles sélectionnées pour modéliser la croissance du SAB.

Les placettes utilisées pour modéliser la croissance potentielle des 14 espèces ou groupes d'espèces sont majoritairement localisées sur des dépôts glaciaires (type 1A, Figure 3), de minces à épais (Figure 4) et dont le régime hydrique est mésique (Figure 5). Quelques espèces font exception : le PIG et le groupe des ARt, qui se retrouvent autant sur des sites ayant un régime hydrique mésique que xérique, le THO, qui se retrouve autant sur des sites ayant un régime hydrique humide que mésique et enfin, le groupe des ARi (surtout représenté par le mélèze), qui se retrouve majoritairement sur des sols dont le régime hydrique est humide.

2.2 Sélection des variables explicatives

Sur les 1000 essais de sélection de variables effectués pour chaque espèce ou groupes d'espèces, le nombre de modèles différents obtenus varie de 50 pour l'EPB à 347 pour l'EPN (131 en moyenne), et le modèle le plus fréquent est obtenu en moyenne dans 29 % des cas (Tableau 6).

Le nombre de paramètres à estimer pour prédire l'accroissement potentiel en surface terrière de chaque espèce ou groupe d'espèces (Tableau 6) varie de 1 (ARi, modèle le plus simple) à 12 (EPN, modèle le plus complexe). Les variables les plus fréquemment sélectionnées sont celles liées aux caractéristiques initiales des peuplements (Figure 6). En effet, le diamètre moyen quadratique initial et la surface terrière totale du peuplement font partie de plus de 85 % des modèles retenus. L'indice de dommages de la TBE, le régime hydrique des sites, la température maximale annuelle et les précipitations totales annuelles sont aussi des caractéristiques relativement communes, puisqu'elles font partie d'au moins 50 % des modèles retenus (Figure 6). Moins de la moitié des modèles ont retenu le type de dépôt de surface ou son épaisseur lors de l'exercice de modélisation (Figure 6). Il faut également noter que les variables explicatives d'altitude et de classe de densité du couvert n'ont été sélectionnées dans aucun des 14 modèles retenus.

2.2.1 Évaluation de la performance des modèles

Le tableau 7 indique les performances des modèles d'accroissement potentiel en surface terrière sur l'échelle logarithmique, pour chaque espèce ou groupe d'espèces. Les valeurs d'ajustement (R^2) des modèles varient de 0,14 (ARi) à 0,58 (AFi) et sont, en moyenne, de 0,40. La valeur relative de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne associée à la prédiction du potentiel d'accroissement de chaque espèce ($REQM_{\%}$) varie de 17 (ARt) à 53 % (ARi), avec une moyenne de 27 %. À l'exception du modèle de prédiction du potentiel d'accroissement du groupe des ARi qui a tendance à surestimer les prédictions, aucun des modèles n'est biaisé (Tableau 7).

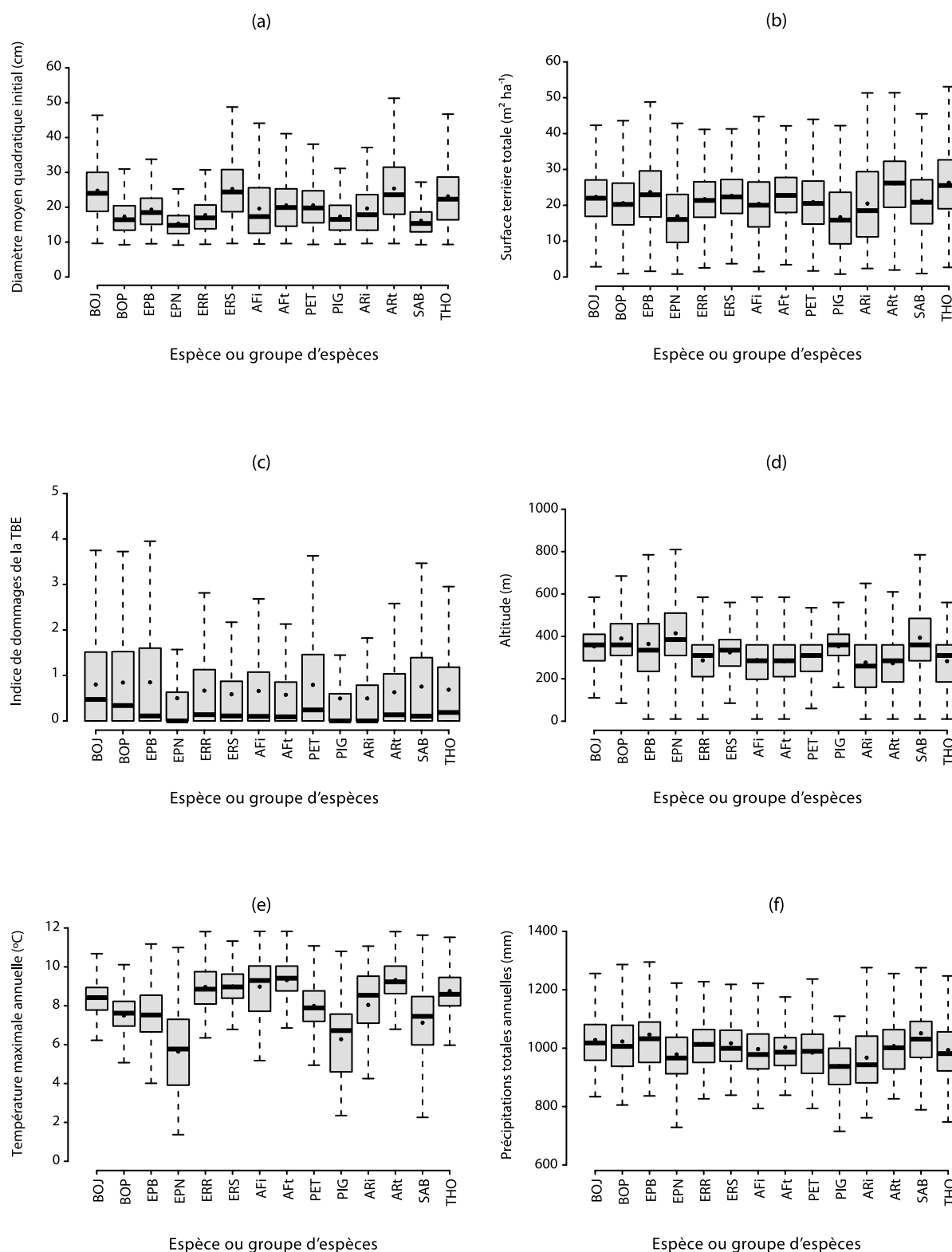


Figure 2. Représentation sous forme de boîtes à moustaches¹ (*boxplot* en anglais) de la distribution des valeurs de chaque variable continue utilisée pour prédire la croissance potentielle de chaque espèce ou groupe d'espèces. La légende des abréviations des noms d'espèces et de groupes d'espèces est présentée aux tableaux 1 et 2.

¹ Une boîte à moustaches est un rectangle avec des « moustaches ». Le bord inférieur du rectangle correspond à la valeur du premier quartile, tandis que le bord supérieur correspond à la valeur du troisième quartile. Le trait gras correspond à la médiane et le point central, à la moyenne. Les moustaches s'étendent jusqu'à la valeur distante d'au maximum 1,5 fois la distance interquartile; s'il y a des valeurs au-delà de ces limites, elles sont indiquées par des astérisques : ce sont des valeurs extrêmes (*outliers*).

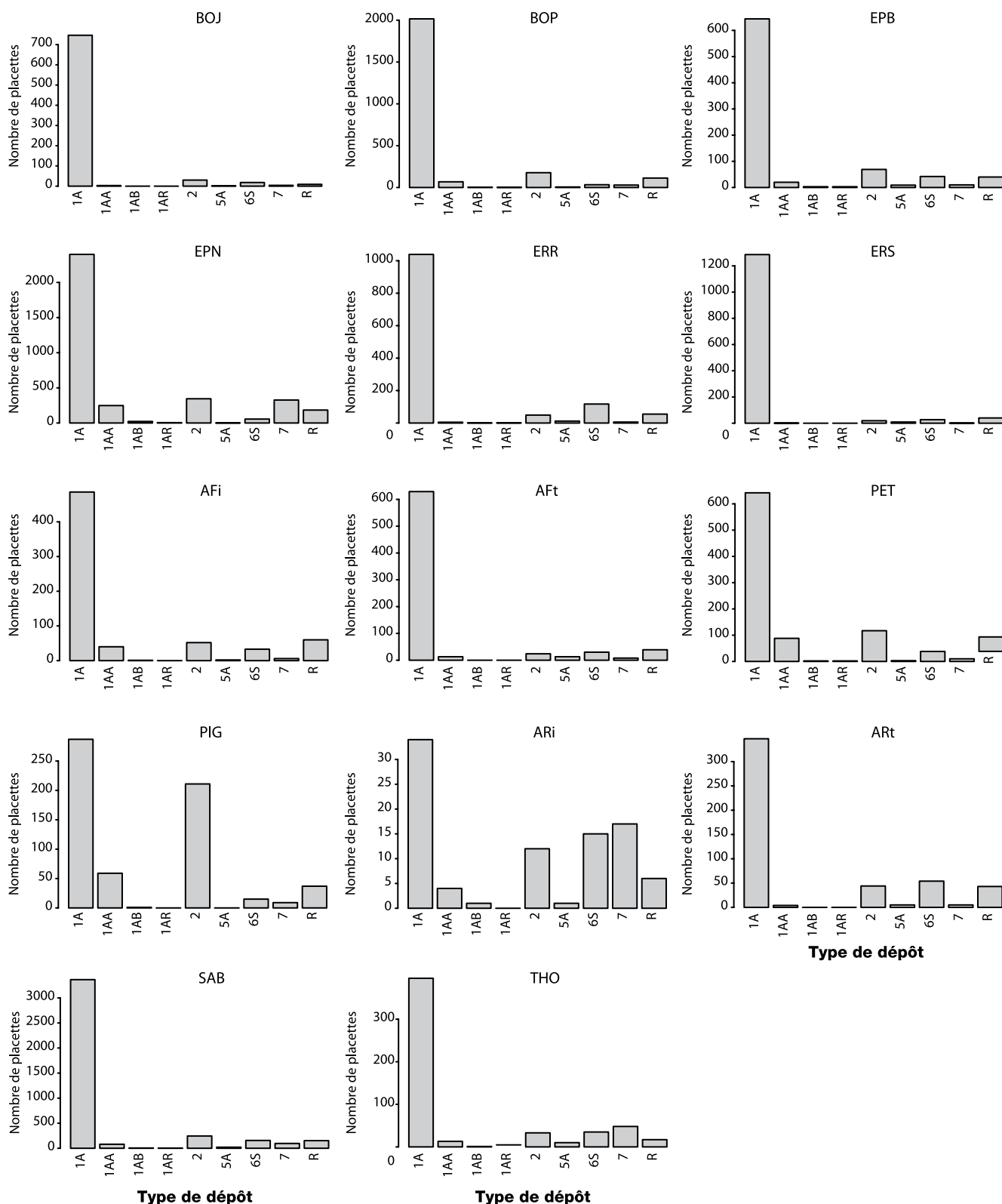


Figure 3. Fréquence de chaque type de dépôt de surface pour chaque espèce ou groupe d'espèces. La légende des abréviations des noms d'espèces et de groupes d'espèces est présentée aux tableaux 1 et 2; celle des types de dépôts de surface est présentée au tableau 3.

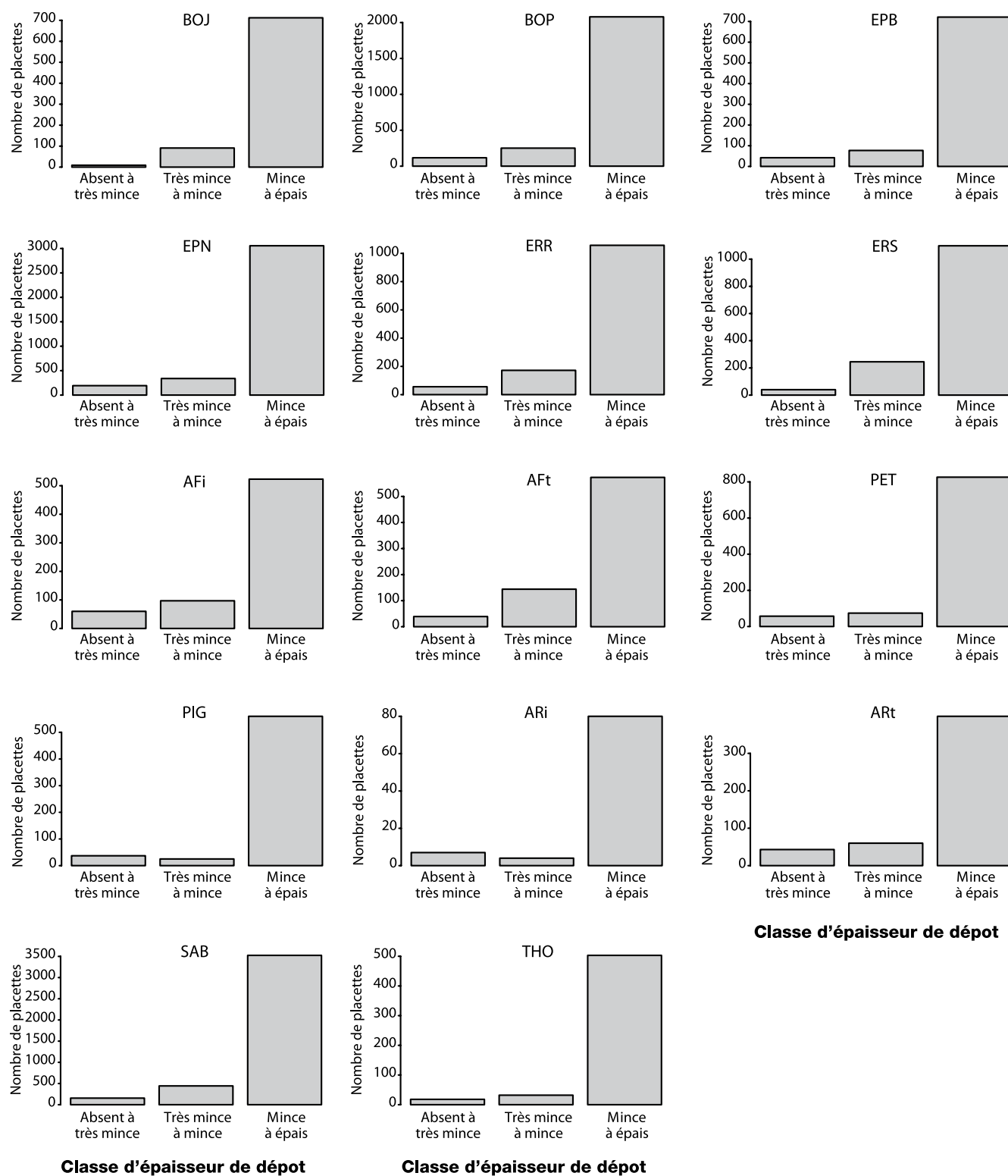


Figure 4. Fréquence de chaque classe d'épaisseur de dépôt de surface pour chaque espèce ou groupe d'espèces. La légende des abréviations des noms d'espèces et de groupes d'espèces est présentée aux tableaux 1 et 2.

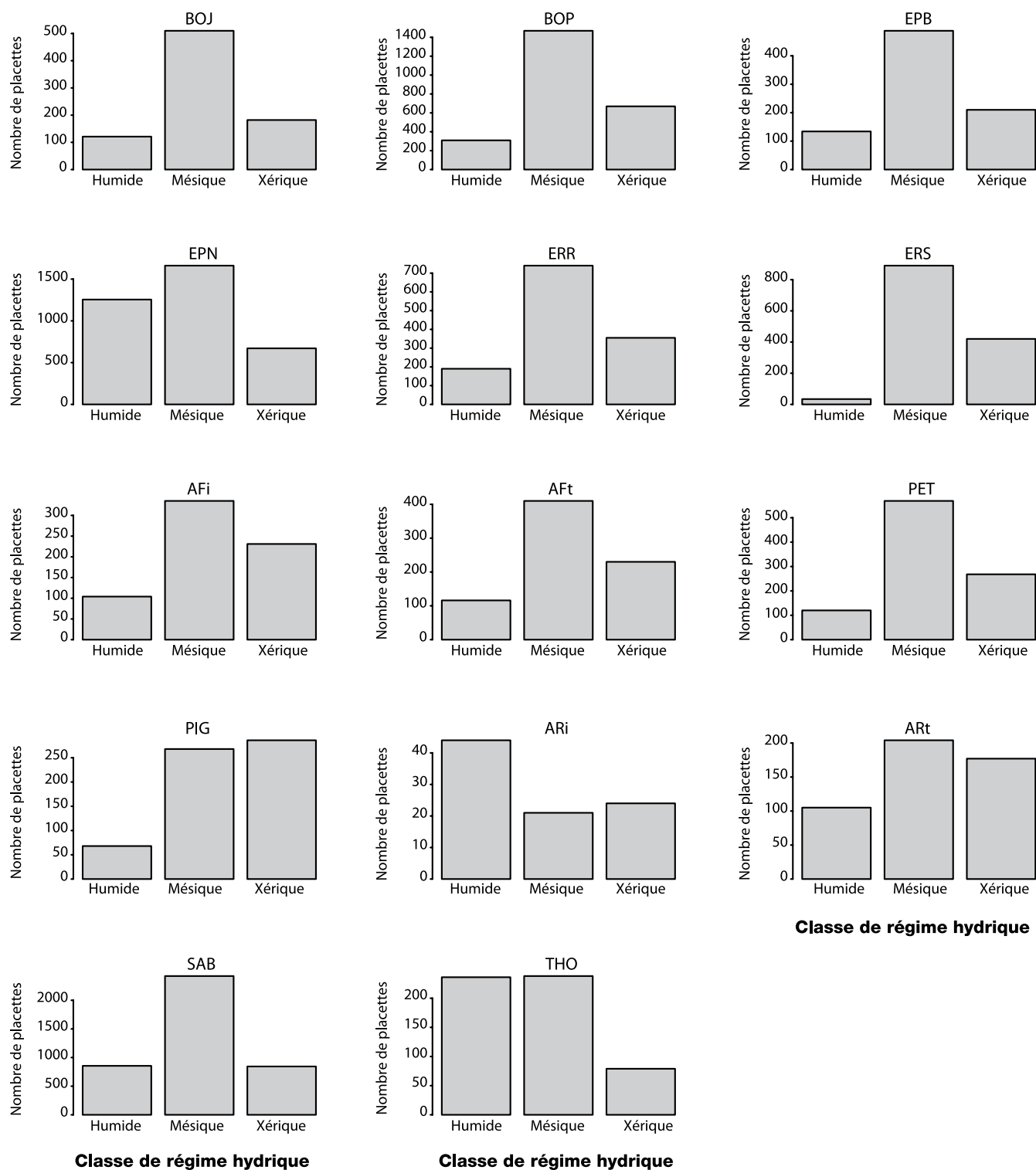


Figure 5. Fréquence de chaque classe de régime hydrique pour chaque espèce ou groupe d'espèces. La légende des abréviations des noms d'espèces et de groupes d'espèces est présentée aux tableaux 1 et 2.

Tableau 6. Nombre de modèles différents, fréquence du modèle le plus courant et fréquence des variables sélectionnées pour chaque espèce ou groupe d'espèces. Au total, pour chaque espèce, 1000 jeux de données différents ont été générés, et donc, 1000 modèles construits. Seules les variables ayant été sélectionnées au moins 250 fois sur les 1000 essais sont mentionnées dans ce tableau. La légende des abréviations des noms d'espèces et de groupes d'espèces est présentée aux tableaux 1 et 2, et celle des variables édaphiques et climatiques, aux tableaux 3 et 4, respectivement

	Espèce ou groupe d'espèces													
	BOJ	BOP	EPB	EPN	ERR	ERS	AFi	Aft	PET	PIG	ARi	ARt	SAB	THO
Nombre de modèles différents	118	154	50	347	136	77	175	161	215	59	63	60	87	131
Nombre de variables incluses dans les modèles	1-14	2-17	1-10	2-20	1-14	2-12	1-19	1-14	1-15	1-10	1-11	1-10	6-18	1-12
Fréquence (%) du modèle le plus courant	15,3	25,2	22,6	5,5	37,7	36,4	22,7	14,4	12,8	59,4	40,4	47,4	40,9	23,6
Fréquence (%) des variables sélectionnées - Effets simples														
Variables de peuplement†														
log(dqi)	100,0	100,0	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	25,7	39,1	100,0	100,0	100,0
{log(dqi)}²				68,6			33,3							
G	99,4	100	98,8	99,4	97,7	100,0	89,2	96,0	93,2			97,3	100,0	75,0
G²			32,2			83,0		26,2				75,5	100,0	
rwri	34,1	90,2	100,0	99,7		35,0						70,2	100,0	
Variables édaphiques														
depotsurf	27,8	88,5		89,9			56,7	62,9	82,6				47,3	31,4
epaisdep			69,4		83,8			28,9	46,3					
reghyd	78,1	79,2		90,0	76,8			65,8	39,1	27,2			96,5	32,4
Variables climatiques														
Tmax	46,2	99,9		100,0	93,3		97,8		99,6	99,9			100,0	
PrecTot	81,9			97,3	98,1	99,5			55,8			98,2	100,0	
Fréquence (%) des variables sélectionnées – Interactions														
G*log(dqi)			37,0				28,6							28,6
G*reghyd				69,5										
G*depotsurf		47,7		28,4										
Tmax*PrecTot				52,9									97,5	
Tmax*reghyd				60,0										

[†] dqi = diamètre moyen quadratique initial; G = surface terrière totale initiale; rwri = indice de dommages de la TBE.

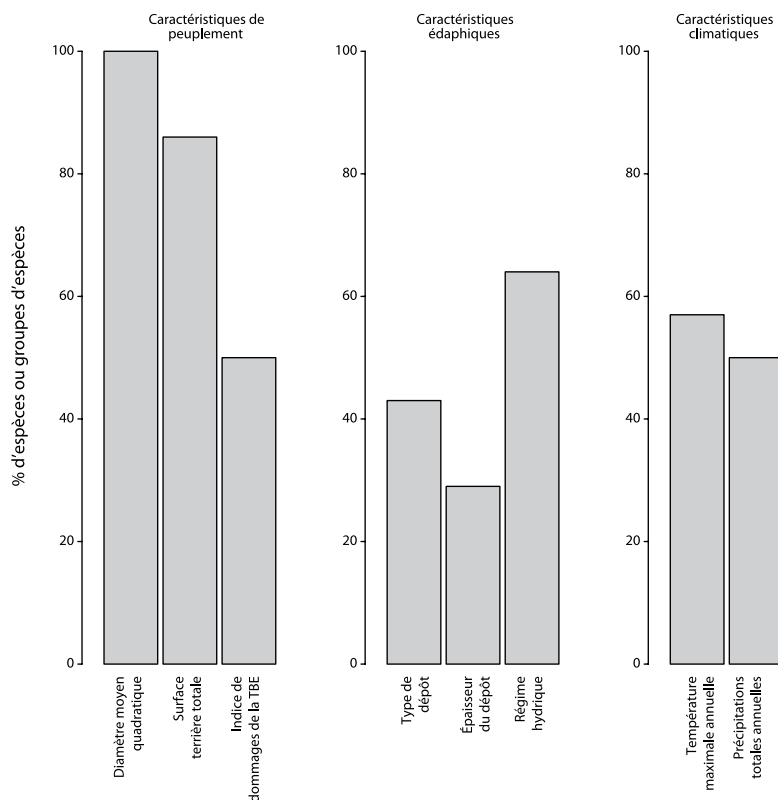


Figure 6. Fréquence relative de la présence des variables associées aux caractéristiques de peuplement, édaphiques et climatiques dans les 14 modèles de prédiction de la croissance potentielle (un modèle de prédiction par espèce ou groupe d'espèces).

Tableau 7. Mesures d'évaluation de la performance des modèles sur l'échelle logarithmique. Les premières valeurs sont celles calculées sur le jeu de données qui a servi à valider les modèles (30 % des données initiales), tandis que celles entre parenthèses ont été calculées sur la totalité des données. La légende des abréviations des noms d'espèces et des groupes d'espèces est présentée aux tableaux 1 et 2

Espèce ou groupe d'espèces	R^2	$REQM$ (cm ² an ⁻¹)	$REQM$ % (%)	Biais (cm ² an ⁻¹)	Biais % (%)
BOJ	0,35 (0,34)	0,44 (0,42)	19 (18)	-0,02 (0,02)	-1 (1)
BOP	0,37 (0,38)	0,56 (0,54)	35 (32)	-0,03 (0,02)	-2 (1)
EPB	0,28 (0,30)	0,61 (0,56)	29 (27)	-0,01 (0,02)	0 (1)
EPN	0,45 (0,47)	0,48 (0,47)	35 (34)	0,01 (0,01)	1 (1)
ERR	0,39 (0,38)	0,47 (0,46)	23 (22)	0,02 (0,02)	1 (1)
ERS	0,43 (0,45)	0,46 (0,46)	19 (19)	0,00 (0,02)	0 (1)
AFi	0,58 (0,53)	0,48 (0,50)	22 (23)	0,00 (0,01)	0 (1)
AFt	0,48 (0,51)	0,55 (0,49)	27 (23)	-0,01 (0,02)	-1 (1)
PET	0,27 (0,32)	0,52 (0,50)	22 (21)	0,00 (0,01)	0 (1)
PIG	0,45 (0,52)	0,55 (0,55)	35 (35)	-0,03 (0,00)	-2 (0)
ARi	0,14 (0,22)	1,03 (0,76)	53 (37)	-0,27 (-0,02)	-14 (-1)
ARt	0,52 (0,54)	0,44 (0,41)	17 (16)	0,00 (0,01)	0 (0)
SAB	0,51 (0,55)	0,47 (0,45)	25 (24)	0,02 (0,01)	1 (1)
THO	0,49 (0,47)	0,45 (0,41)	21 (19)	0,01 (0,02)	0 (1)

Le coefficient de détermination et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne ont servi à regrouper les espèces en cinq groupes en fonction de la performance de leur modèle de prédiction (Figure 7). Le premier groupe comprend les espèces ayant la valeur d'ajustement des modèles la plus élevée (R^2 moyen = 0,52) et l'erreur la plus faible ($REQM_{\%}$ moyen = 22 %). Il inclut le SAB, le THO, les ART, les AFI et les AFT. Le deuxième groupe de modèles montre une valeur d'ajustement relativement élevée (R^2 moyen = 0,39) et une erreur de prédiction de 20 % en moyenne. On y retrouve l'ERR, l'ERS et le BOJ. Le troisième groupe, constitué des modèles de l'EPN, du BOP et du PIG, a une valeur d'ajustement légèrement meilleure (R^2 moyen = 0,42) que celle du groupe précédent, mais une erreur de prédiction moyenne plus importante ($REQM_{\%}$ moyen = 35 %). Le quatrième groupe, constitué des modèles de l'EPB et du PET, présente une valeur d'ajustement relativement faible ($R^2 = 0,28$ en moyenne) et une erreur de prédiction moyenne de 26 %. Enfin, le modèle du groupe des ARI se classe à part des autres et au dernier rang, avec une valeur d'ajustement très faible ($R^2 = 0,14$) et une erreur de prédiction importante ($REQM_{\%} = 53$ %).

2.2.2 Étalonnage des modèles finaux

Les estimés des paramètres des équations de prédiction du potentiel de croissance sont indiqués pour chaque espèce ou groupe d'espèces à l'annexe 1. Les mesures d'évaluation des modèles ont également été calculées sur l'ensemble des données initiales, ce qui

correspond au jeu de données utilisé pour étalonner les modèles finaux. Ces mesures d'évaluation sont comparables à celles calculées sur le jeu de validation (Tableau 7).

2.2.3 Modèles par espèce ou groupe d'espèces

Pour toutes les espèces et tous les groupes d'espèces considérés, l'influence des variables de peuplement que sont le diamètre moyen quadratique initial (Figure 8a) et la surface terrière totale initiale (Figure 8b) sur la croissance potentielle est sensiblement la même : celle-ci augmente en fonction du diamètre quadratique initial des arbres, et diminue en fonction de la surface terrière totale initiale du peuplement.

Des graphiques ont été produits en utilisant un arbre de référence afin d'illustrer les relations entre les caractéristiques biogéoclimatiques et la prévision de la croissance potentielle. Ils sont présentés dans les sections suivantes, pour chaque espèce ou groupe d'espèces. Le tableau 8 indique quelles sont les caractéristiques moyennes¹ (ou plus fréquentes) des peuplements en fonction de chacune des espèces. Afin d'illustrer la relation entre la variable dépendante et la variable explicative, la valeur de toutes les autres variables du modèle final est fixée à leur valeur de référence; seule la variable d'intérêt varie. Notons que tous les pourcentages indiqués dans les sections suivantes sont relatifs aux valeurs utilisées pour faire les prédictions.

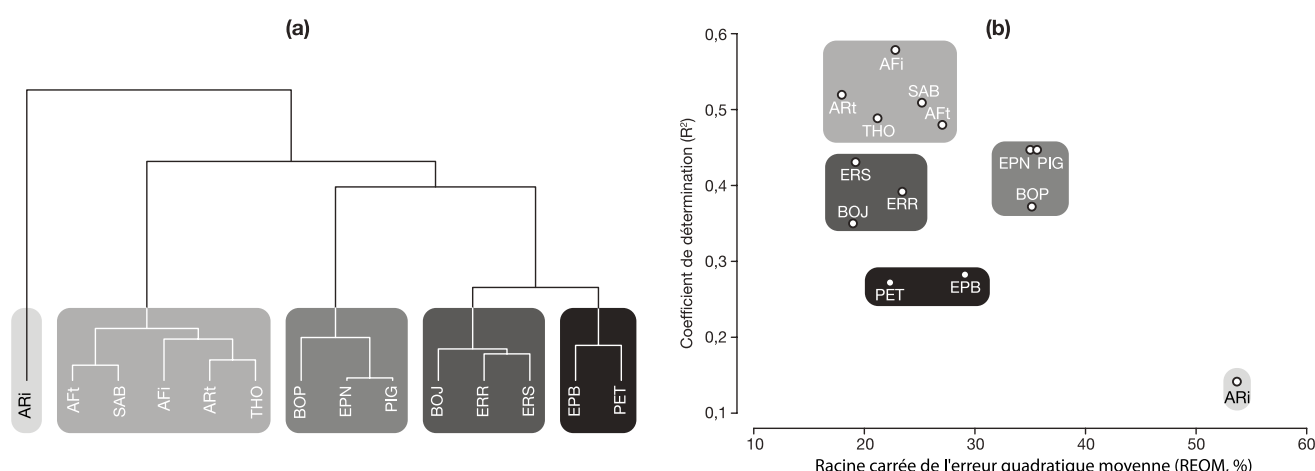


Figure 7. Dendrogramme (a) et projection dans l'espace des métriques utilisées pour évaluer la performance des modèles de prédiction de la croissance potentielle des cinq groupements (b). En tons de gris et de noir, les cinq groupements. La légende des abréviations des noms d'espèces et de groupes d'espèces est présentée aux tableaux 1 et 2.

¹ Pour les variables climatiques, ce sont les normales climatiques 1971-2000 qui ont été utilisées.

Tableau 8. Caractéristiques des peuplements de référence (c'est-à-dire les peuplements les plus communs). Les valeurs sont soit la valeur moyenne (pour les variables continues), soit la valeur la plus fréquente (pour les variables catégoriques). Ces valeurs ont servi à l'élaboration des figures 8 à 21. La légende des codes des noms d'espèces et de groupes d'espèces est présentée aux tableaux 1 et 2

Espèce ou groupe d'espèces	Diamètre moyen quadratique initial (cm)	Surface terrière totale initiale ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	Indice de réduction de la croissance (TBE)	Température maximale annuelle ($^{\circ}\text{C}$)	Précipitations totales annuelles (mm)	Régime hydrique	Type de dépôt de surface	Épaisseur du dépôt de surface
BOJ	23,42	22,42	0,80	8,43	1027,9	modéré	1A	
BOP	16,68	20,61	0,85	7,51		modéré	1A	
EPB	18,58	23,66	0,85					mince à épais
EPN	14,94	16,88	0,50	5,64	978,2	modéré	1A	
ERR	17,05	21,70		8,96	1014,5	modéré		mince à épais
ERS	23,83	22,62	0,59		1016,5			
AFi	18,06	20,36		8,99			1A	
AFt	19,42	22,85				modéré	1A	mince à épais
PET	19,61	20,86		8,00	984,3	modéré bon à excessif	1A	mince à épais
PIG	16,72			6,28				
ARi	18,32							
ARt	23,67	26,13	0,63		1007,1			
SAB	15,67	21,29	0,76	7,13	1050,8	modéré	1A	
THO	21,76	26,35				modéré	1A	

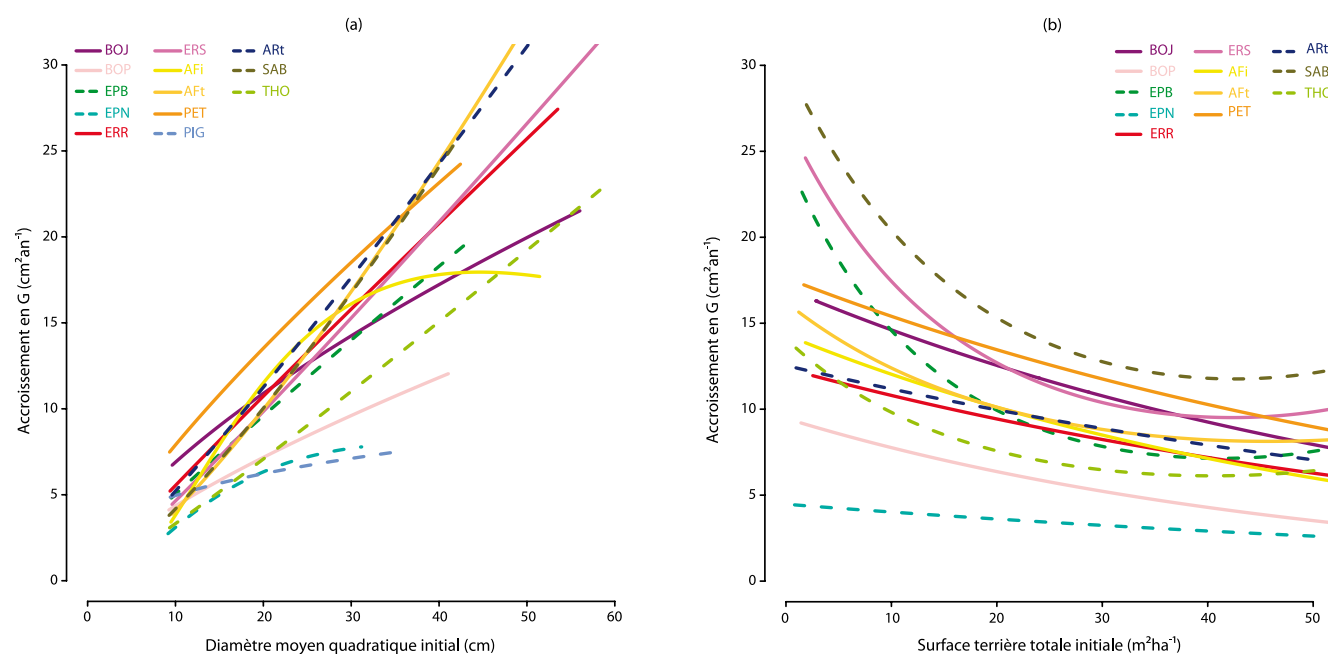


Figure 8. Influence du diamètre moyen quadratique initial des arbres (a) et de la surface terrière totale initiale des peuplements (b) sur les prévisions de la croissance potentielle des espèces ou groupes d'espèces. La légende des abréviations des noms d'espèces et de groupes d'espèces est présentée aux tableaux 1 et 2. Les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.1 Le bouleau jaune

La croissance du BOJ diminue lorsque la température augmente; la différence est d'environ 30 % entre les sites les plus chauds et les moins chauds (Figure 9a). Par contre, la croissance du BOJ augmente en fonction des précipitations; la différence de croissance sur les sites qui reçoivent le plus de précipitations et ceux qui en reçoivent le moins est de l'ordre de 50 % (Figure 9b). Par la réduction de la surface foliaire des résineux et de la densité des peuplements, les épidémies sévères de TBE favorisent la croissance potentielle en surface terrière du BOJ (Figure 9c); la différence de croissance en l'absence d'épidémie (indice 0) et en présence d'épidémie sévère (indice 5) est de l'ordre de 30 %. Pour finir, les sites mésiques semblent avoir un potentiel de croissance légèrement supérieur (gain d'environ 10 %) à celui des sites humides ou xériques (Figure 9d).

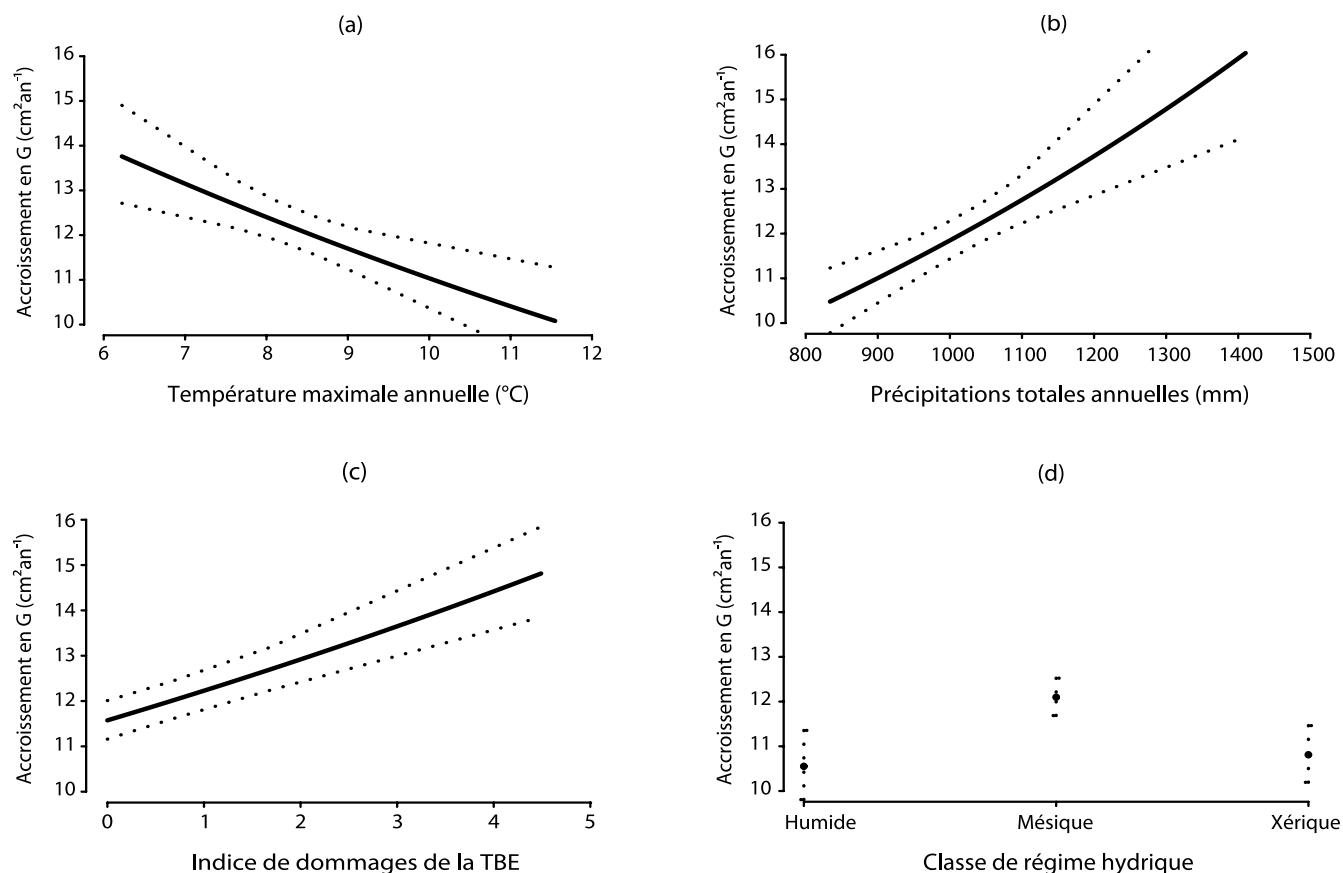


Figure 9. Prédiction de la croissance potentielle du bouleau jaune (BOJ) en fonction de la température maximale annuelle (a), des précipitations totales annuelles (b), de l'indice de dommages de la TBE (c) et du régime hydrique des sols (d). Sur les graphiques, sont indiqués les estimations (ligne continue ou points pleins) et les intervalles de confiance à 95 % (lignes pointillées). Les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.2 Le bouleau à papier

La croissance du BOP augmente avec la hausse de la température (Figure 10a); les BOP situés sur les sites les plus chauds présentent une croissance de près de huit fois supérieure à celle des BOP situés sur les sites les plus froids. Les épidémies de TBE favorisent la croissance potentielle en surface terrière du BOP (Figure 10b); la différence de croissance en l'absence d'épidémie et en présence d'épidémie sévère est de l'ordre de 40 %. Bien qu'il y ait une grande variabilité de réponse, il semblerait que les BOP situés sur les dépôts marins (5A; Figure 10c) aient une meilleure croissance que ceux qui croissent sur les autres types de dépôt. Les sites les moins bien drainés sont les moins favorables à une bonne croissance du BOP (Figure 10d).

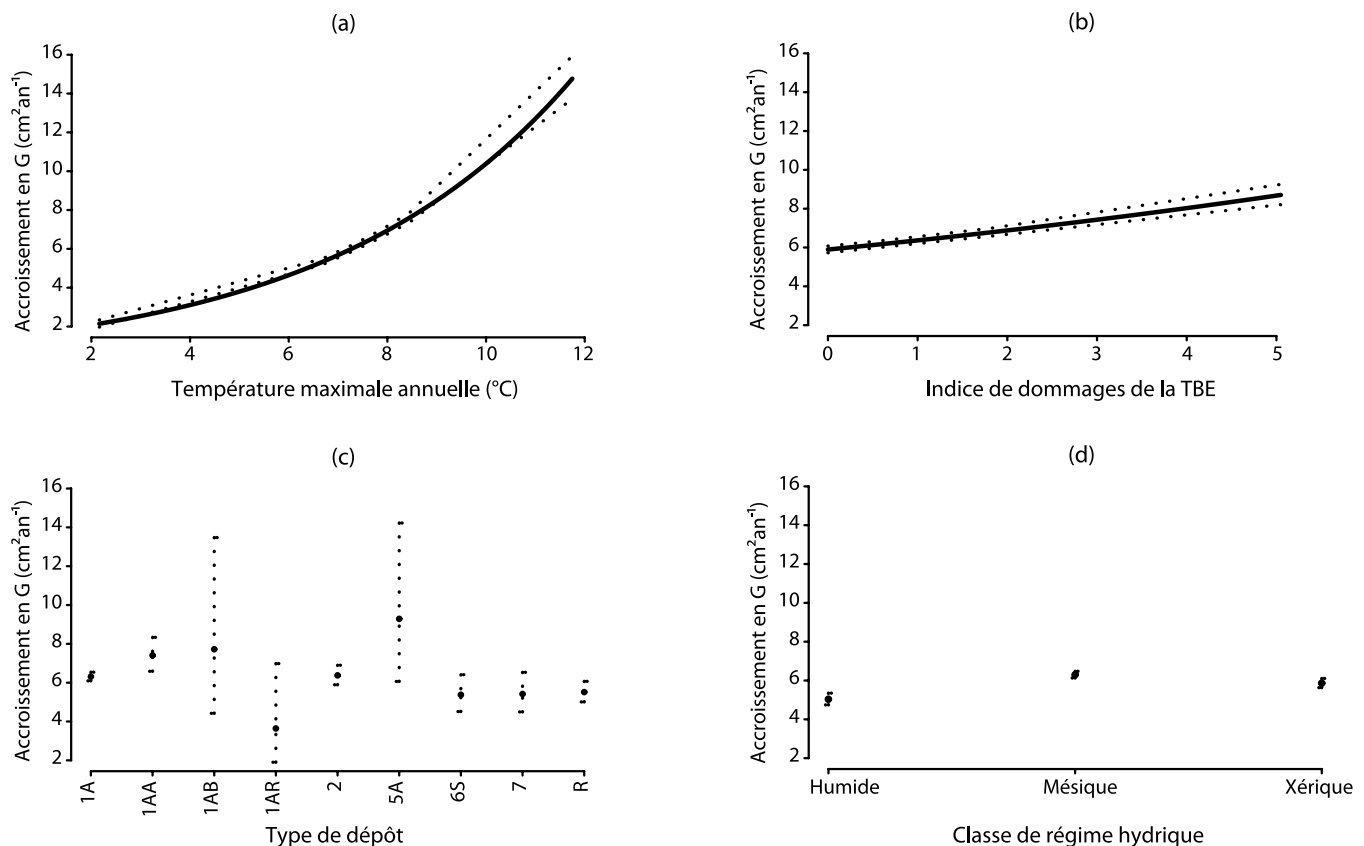


Figure 10. Prédiction de la croissance potentielle du bouleau à papier (BOP) en fonction de la température maximale annuelle (a), de l'indice de dommages de la TBE (b), du type de dépôt de surface (c) et du régime hydrique des sols (d). Sur les graphiques, sont indiqués les estimations (ligne continue ou points pleins) et les intervalles de confiance à 95 % (lignes pointillées). Les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.3 L'épinette blanche

La croissance potentielle en surface terrière de l'EPB diminue en fonction de la sévérité des épidémies de TBE (Figure 11a); en présence d'épidémie sévère, elle est environ 55 % moins grande qu'en l'absence d'épidémie. La croissance potentielle de l'EPB est également favorisée par des dépôts de surface plus épais (Figure 11b); la croissance est environ 50 % supérieure sur un site pourvu d'un sol mince à épais, comparativement à un site ayant un sol absent à très mince (Figure 11b).

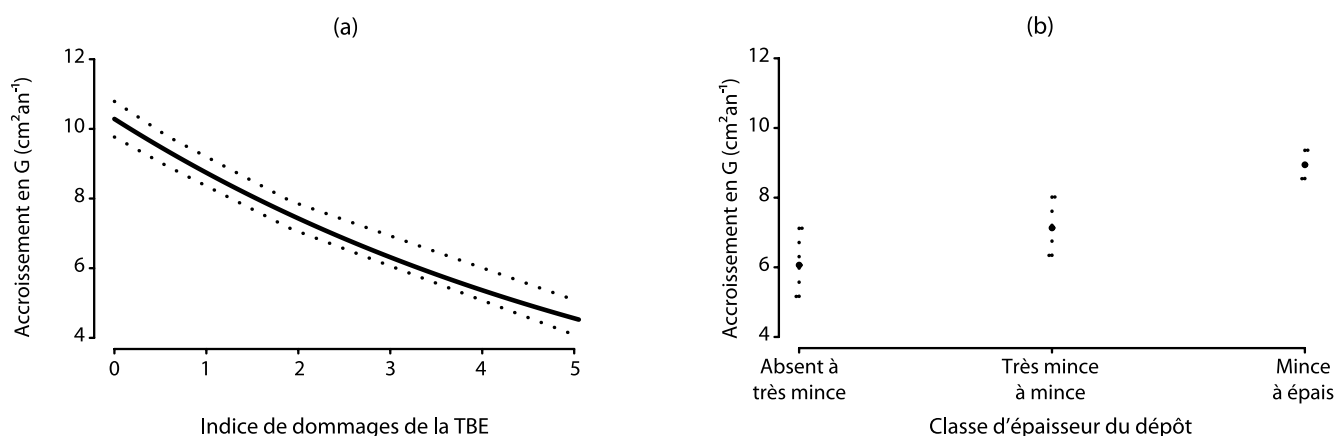


Figure 11. Prédiction de la croissance potentielle de l'épinette blanche (EPB) en fonction de l'indice de dommages de la TBE (a) et de l'épaisseur du dépôt de surface (b). Sur les graphiques, sont indiqués les estimations (ligne continue ou points pleins) et les intervalles de confiance à 95 % (lignes pointillées). Les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.4 L'épinette noire

La croissance potentielle en surface terrière de l'EPN est favorisée par une augmentation de la température et des précipitations (Figures 12a et 12b). En effet, il existe une interaction significative entre ces deux facteurs (Tableau 6). L'influence positive de la température sur la croissance est plus importante sur les sites pluvieux que sur les sites secs. Autrement dit, l'influence positive des précipitations est plus importante sur les sites plus chauds comparativement aux sites plus froids. Par ailleurs, la croissance de l'EPN diminue avec la hausse de la sévérité des épidémies de TBE (Figure 12c); la différence entre la croissance

en l'absence d'épidémie et celle en présence d'épidémie sévère est de l'ordre de 20 %. Les dépôts organiques (type 7, Figure 12d) sont les plus défavorables à la croissance de l'EPN, tandis que les plus favorables semblent être les dépôts marins (type 5A). Une interaction significative a également été décelée entre la température et le régime hydrique (Tableau 6). La croissance potentielle de l'EPN augmente avec la hausse de la température pour tous les régimes hydriques (Figure 12e), mais de façon moins marquée sur les sites xériques. Les différences sont toutefois minimes.

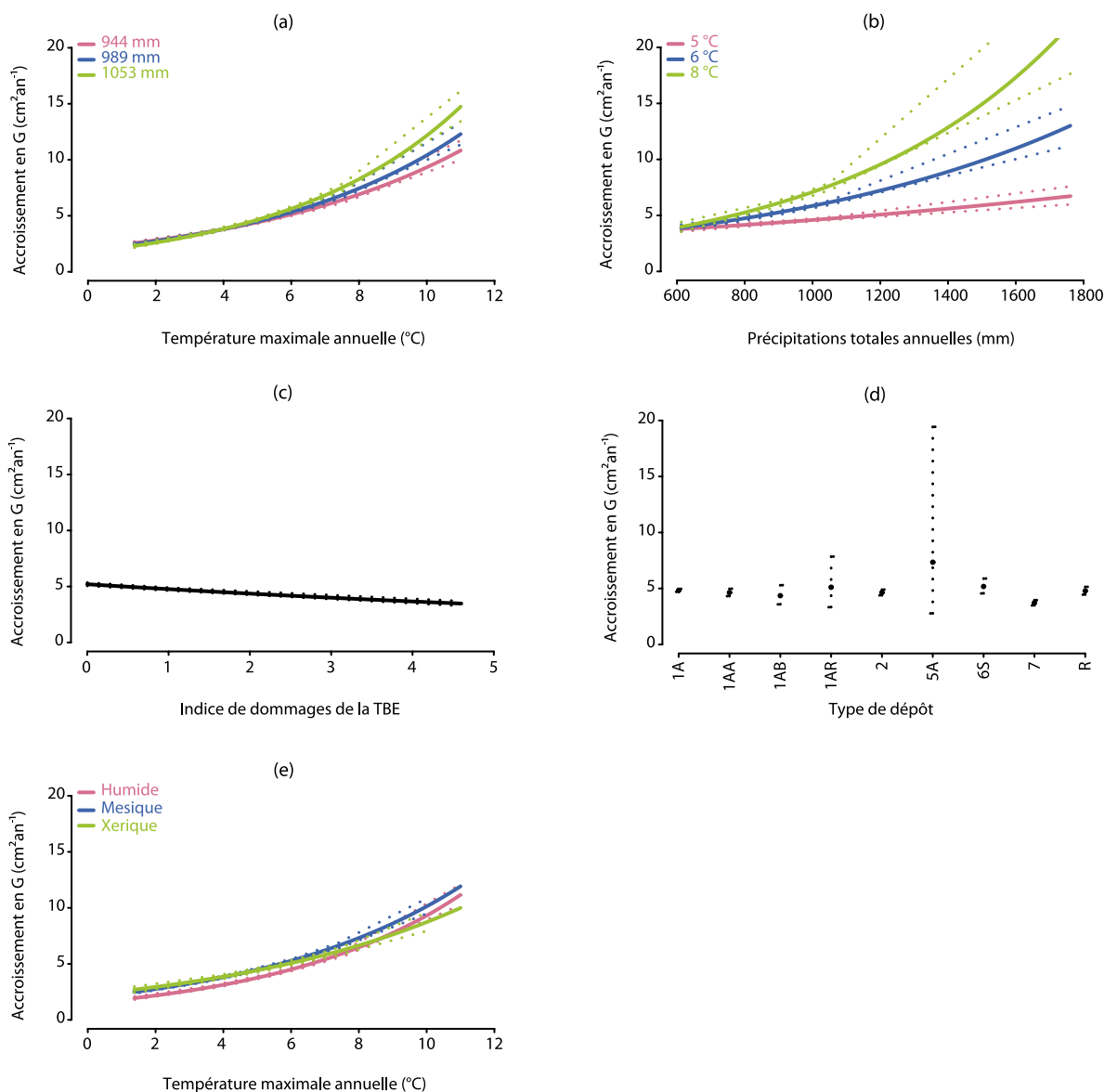


Figure 12. Prédiction de la croissance potentielle de l'épinette noire (EPN) en fonction de la température maximale annuelle (a), des précipitations totales annuelles (b), de l'indice de dommages de la TBE (c), du type de dépôt de surface (d) et du régime hydrique des sols (e). Sur les graphiques, sont indiqués les estimations (ligne continue ou points pleins) et les intervalles de confiance à 95 % (lignes pointillées). Les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.5 L'érable rouge

La croissance potentielle en surface terrière de l'ERR est favorablement influencée par la température maximale annuelle (Figure 13a); la différence entre les sites les plus chauds et les sites les plus froids est d'environ 50 %. Les précipitations abondantes réduisent la croissance potentielle de l'ERR (Figure 13b), mais dans une moindre mesure que la température (3 % de différence entre les conditions de précipitations extrêmes). En outre, plus l'épaisseur du dépôt est grande, meilleure est la croissance potentielle de l'ERR (Figure 13c); sur les sols minces à épais, celle-ci est 40 % de plus que sur des sols absents à très minces. Par ailleurs, la croissance de cette espèce est également inférieure sur les sites xériques, comparativement aux sites humides (15 % de moins) et mésiques (12 % de moins) (Figure 13d).

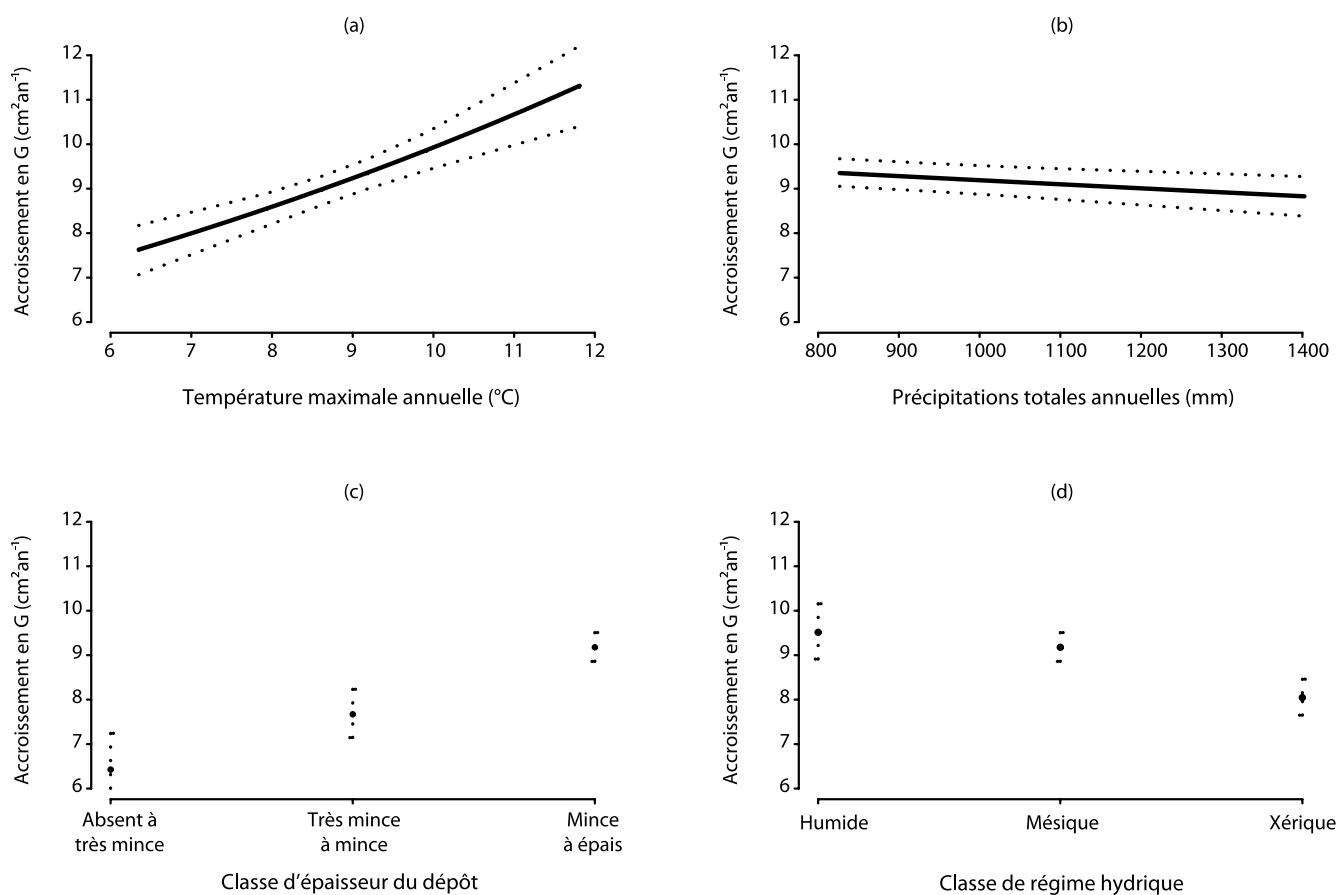


Figure 13. Prévion de la croissance potentielle de l'érable rouge (ERR) en fonction de la température maximale annuelle (a), des précipitations totales annuelles (b), de l'épaisseur du dépôt de surface (c) et du régime hydrique des sols (d). Sur les graphiques, sont indiqués les estimations (ligne continue ou points pleins) et les intervalles de confiance à 95 % (lignes pointillées). Les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.6 L'érable à sucre

La croissance potentielle de l'ERS diminue lorsque les précipitations sont abondantes (Figure 14a). La différence de croissance potentielle entre les sites les plus pluvieux et les plus secs est de l'ordre de 10 %. Par ailleurs, en présence d'épidémies sévères de TBE, la croissance potentielle en surface terrière de l'ERS augmente d'un peu plus de 10 %, par rapport à la situation observée en l'absence d'épidémie (Figure 14b).

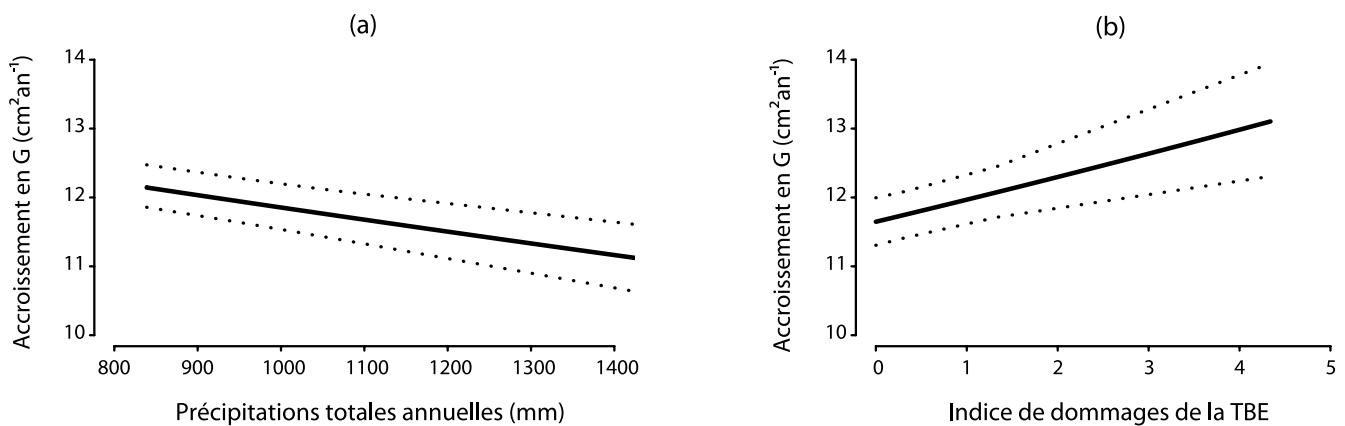


Figure 14. Prédiction de la croissance potentielle de l'érable à sucre (ERS) en fonction des précipitations totales annuelles (a) et de l'indice de dommages de la TBE (b). Sur les graphiques, sont indiqués les estimations (ligne continue) et les intervalles de confiance à 95 % (lignes pointillées). Les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.7 Le groupe des autres feuillus intolérants

Parmi les variables étudiées, seuls la température (Figure 15a) et le type de dépôt de surface (Figure 15b) influencent la croissance potentielle en surface terrière du groupe des AFi. La croissance est environ trois fois supérieure sur les sites les plus chauds comparativement à celle des sites les plus froids. Les dépôts des littoraux marins (type 6S) et les dépôts organiques (type 7) semblent être les plus défavorables à la croissance des AFi; la croissance potentielle observée sur ceux-ci est diminuée approximativement de moitié par rapport à celle sur les autres types de dépôt.

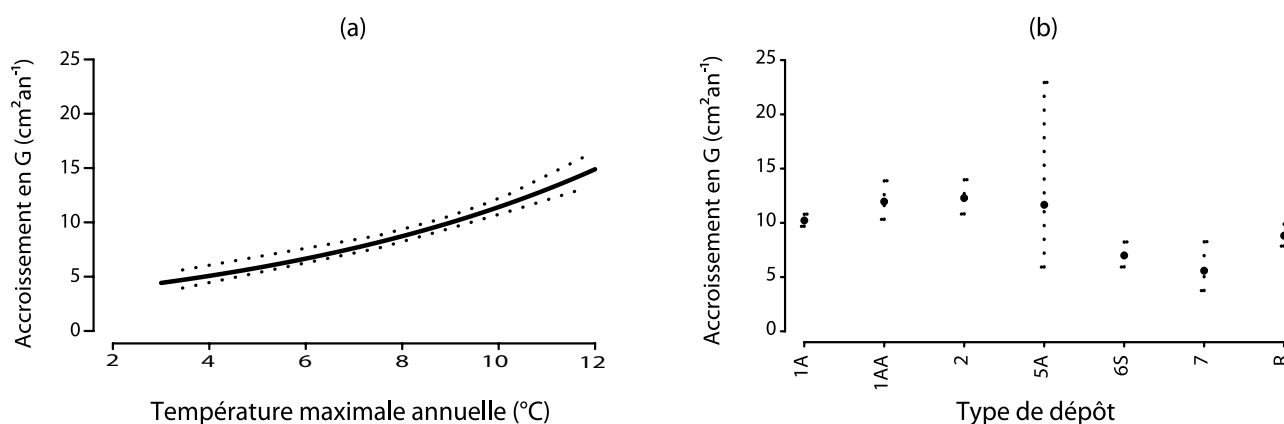


Figure 15. Prédiction de la croissance potentielle du groupe des autres feuillus intolérants (AFi) en fonction de la température maximale annuelle (a) et du type de dépôt de surface (b). Sur les graphiques, sont indiqués les estimations (ligne continue ou points pleins) et les intervalles de confiance à 95 % (lignes pointillées). La liste des espèces constituant ce groupe est indiquée au tableau 2, tandis que les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.8 Le groupe des autres feuillus tolérants

Les variables climatiques n'ont pas d'effet significatif sur la croissance potentielle en surface terrière du groupe des AFt, que l'on retrouve essentiellement au sud de la province; les gradients de température et de précipitations sont non significatifs pour ce groupe. En contraste, les types de dépôt de surface (Figure 16a), leur épaisseur (Figure 16b) ainsi que le type de régime hydrique (Figure 16c) influencent la croissance des AFt. Celle-ci est plus faible sur les affleurements rocheux (type R), sur les sols très minces à minces ainsi que sur ceux dont le régime hydrique est humide.

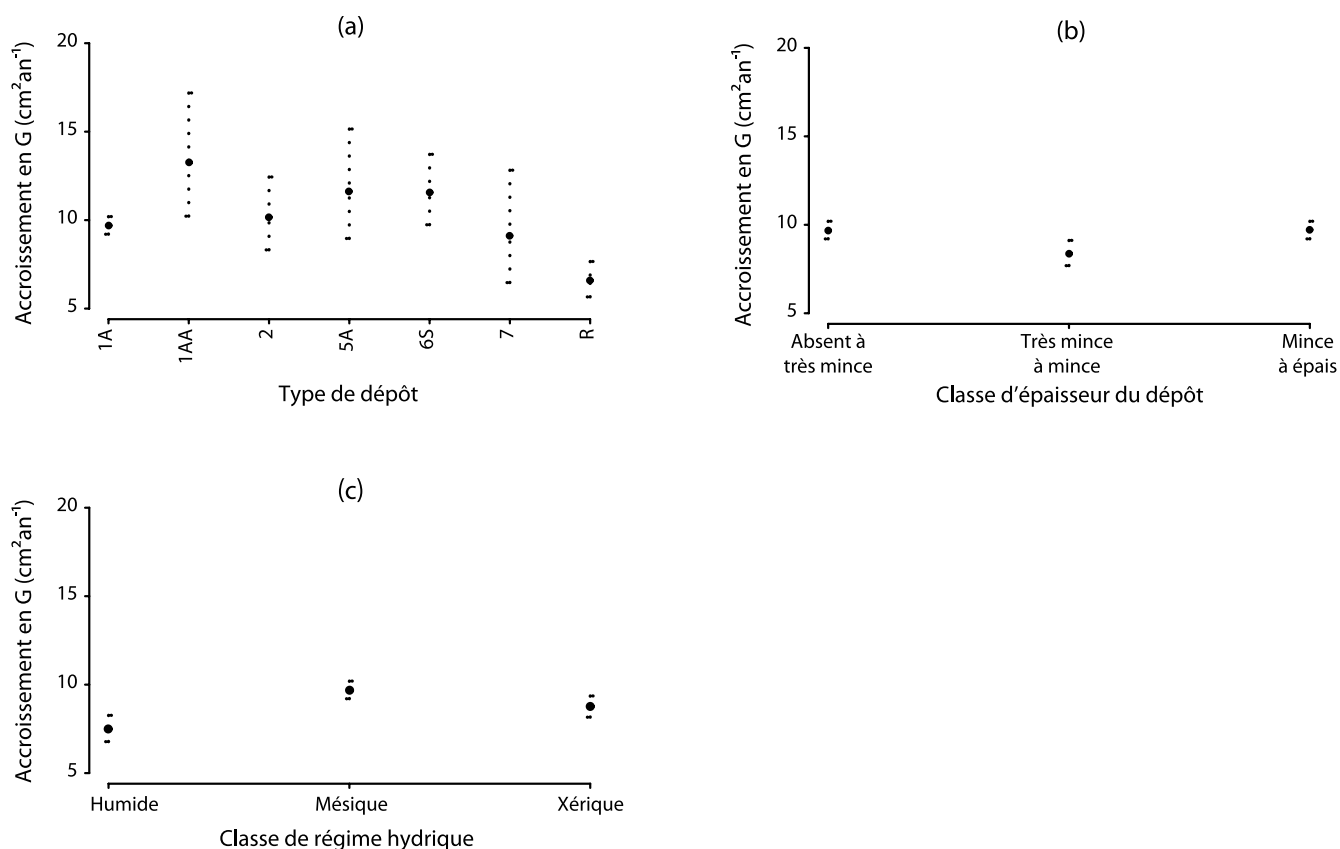


Figure 16. Prédiction de la croissance potentielle du groupe des autres feuillus tolérants (AFt) en fonction du type de dépôt de surface (a), de son épaisseur (b) et du régime hydrique des sols (c). Sur les graphiques, sont indiqués les estimations (points pleins) et les intervalles de confiance à 95 % (lignes pointillées). La liste des espèces constituant ce groupe est indiquée au tableau 2, tandis que les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.9 Le peuplier faux-tremble

La croissance potentielle en surface terrière du PET augmente largement en fonction de la température (Figure 17a); les PET localisés sur les sites les plus chauds ont une croissance de près de quatre fois supérieure à ceux sur les sites les plus froids. Des précipitations abondantes favorisent aussi la croissance du PET (Figure 17b); les sites les plus pluvieux ont une croissance potentielle du PET d'environ 30 %

supérieure aux sites les moins pluvieux. Les dépôts glaciaires (type 1A, 1AA et 1AB, Figure 17c) semblent aussi favoriser la croissance du PET. Les dépôts très minces à minces (Figure 17d) semblent être les plus défavorables à la croissance du PET. Aussi, plus le drainage des sites est lent, meilleure est la croissance du PET (Figure 17e). Toutefois, les différences sont plutôt faibles.

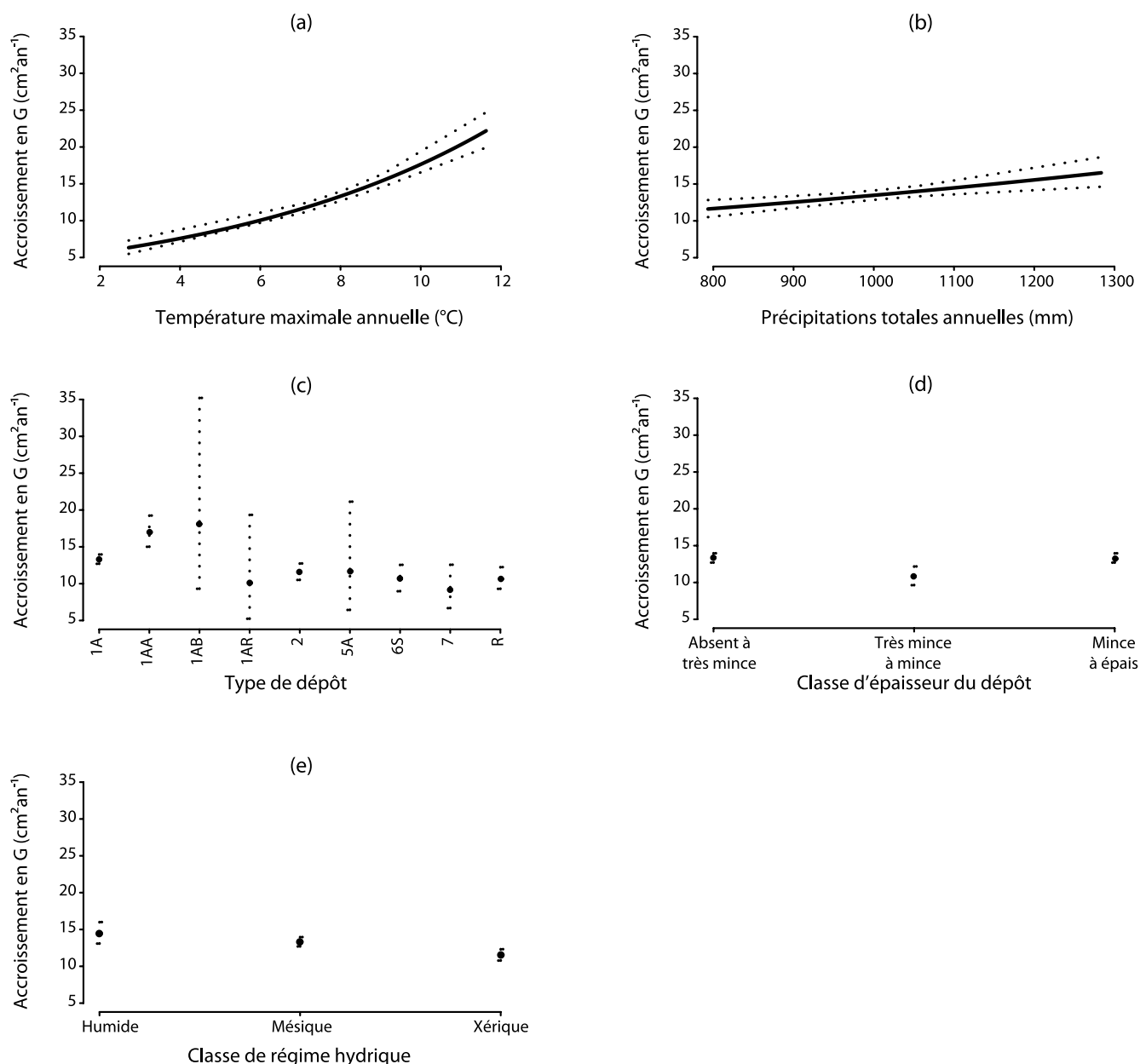


Figure 17. Prédiction de la croissance potentielle du peuplier faux-tremble (PET) en fonction de la température maximale annuelle (a), des précipitations totales annuelles (b), du type de dépôt de surface (c), de son épaisseur (d) et du régime hydrique des sols (e). Sur les graphiques, sont indiqués les estimations (ligne continue ou points pleins) et les intervalles de confiance à 95 % (lignes pointillées). Les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.10 Le pin gris

La température et le régime hydrique sont les seules variables étudiées qui influencent la croissance potentielle en surface terrière du PIG. L'effet de la température est majeur (Figure 18a), puisque la croissance du PIG est près de dix fois supérieure sur les sites les plus chauds comparativement aux sites les plus froids. On retrouve aussi une croissance potentielle du PIG plus élevée (de l'ordre de 45 %) sur les sites xériques par rapport aux sites mésiques et humides (Figure 18b).

2.2.3.11 Le groupe des autres résineux intolérants

Aucune caractéristique de site n'a été retenue dans le modèle des ARi. Les valeurs d'ajustement sont très faibles ($R^2 = 0,14$) et le modèle surestime les prédictions (Tableau 7). Avec les données utilisées et surtout avec le choix de groupement d'espèces que nous avons fait, il n'a pas été possible de correctement modéliser le potentiel de croissance de ce groupe d'espèces.

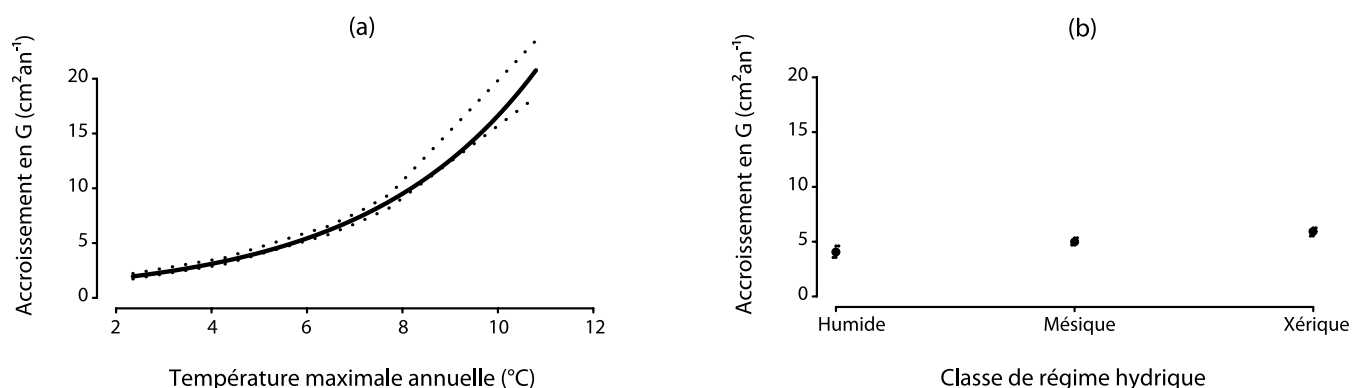


Figure 18. Prédiction de la croissance potentielle du pin gris (PIG) en fonction de la température maximale annuelle (a) et du régime hydrique des sols (b). Sur les graphiques, sont indiqués les estimations (ligne continue ou points pleins) et les intervalles de confiance à 95 % (lignes pointillées). Les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.12 Le groupe des autres résineux tolérants

La hausse des précipitations réduit la croissance potentielle en surface terrière du groupe des ARt (Figure 19a). En effet, la différence de potentiel de croissance est de l'ordre de 55 % entre les sites qui reçoivent le plus de précipitations et ceux qui en reçoivent le moins. En outre, le potentiel de croissance des ARt sur un site diminue en fonction de la sévérité des épidémies de TBE (Figure 19b); la croissance potentielle observée en l'absence d'épidémie est inférieure de 25 % à celle observée en présence d'épidémie sévère.

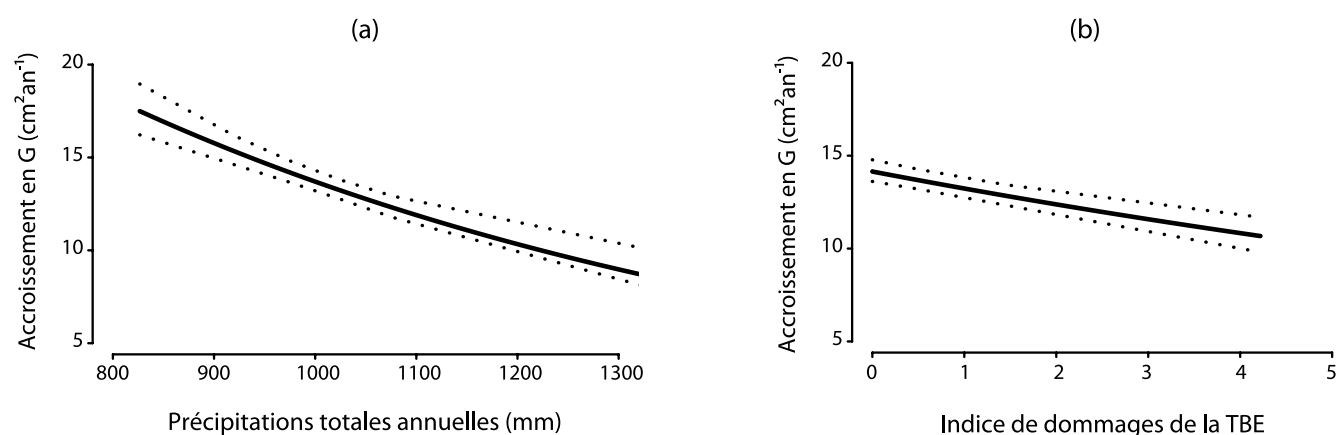


Figure 19. Prévion de la croissance potentielle du groupe des autres résineux tolérants (ARt) en fonction des précipitations totales annuelles (a) et de l'indice de dommages de la TBE (b). Sur les graphiques, sont indiqués les estimations (ligne continue) et les intervalles de confiance à 95 % (lignes pointillées). La liste des espèces constituant ce groupe est indiquée au tableau 2, tandis que les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.13 Le sapin baumier

La croissance potentielle en surface terrière du SAB est favorisée par une augmentation conjointe de la température et des précipitations (Figures 20a et 20b). En effet, il existe une interaction significative entre ces deux facteurs (Tableau 6). L'influence positive de la température sur la croissance potentielle est plus importante sur les sites pluvieux que sur les sites plus secs. Autrement dit, l'influence positive des précipitations est plus marquée sur les sites plus chauds que sur les sites plus froids. D'autre part, la croissance du SAB est grandement influencée par la

sévérité des épidémies de TBE (Figure 20c), ce qui n'est pas très surprenant, puisque le SAB est l'espèce de prédilection de l'insecte. En présence d'épidémies très sévères, la croissance potentielle est diminuée de moitié comparativement à celle observée sur des sites non touchés par une épidémie. En outre, la croissance du SAB est défavorisée sur les dépôts organiques (type 7, Figure 20d) et les sols mal drainés (Figure 20e), mais l'effet de ces deux caractéristiques n'est pas très important.

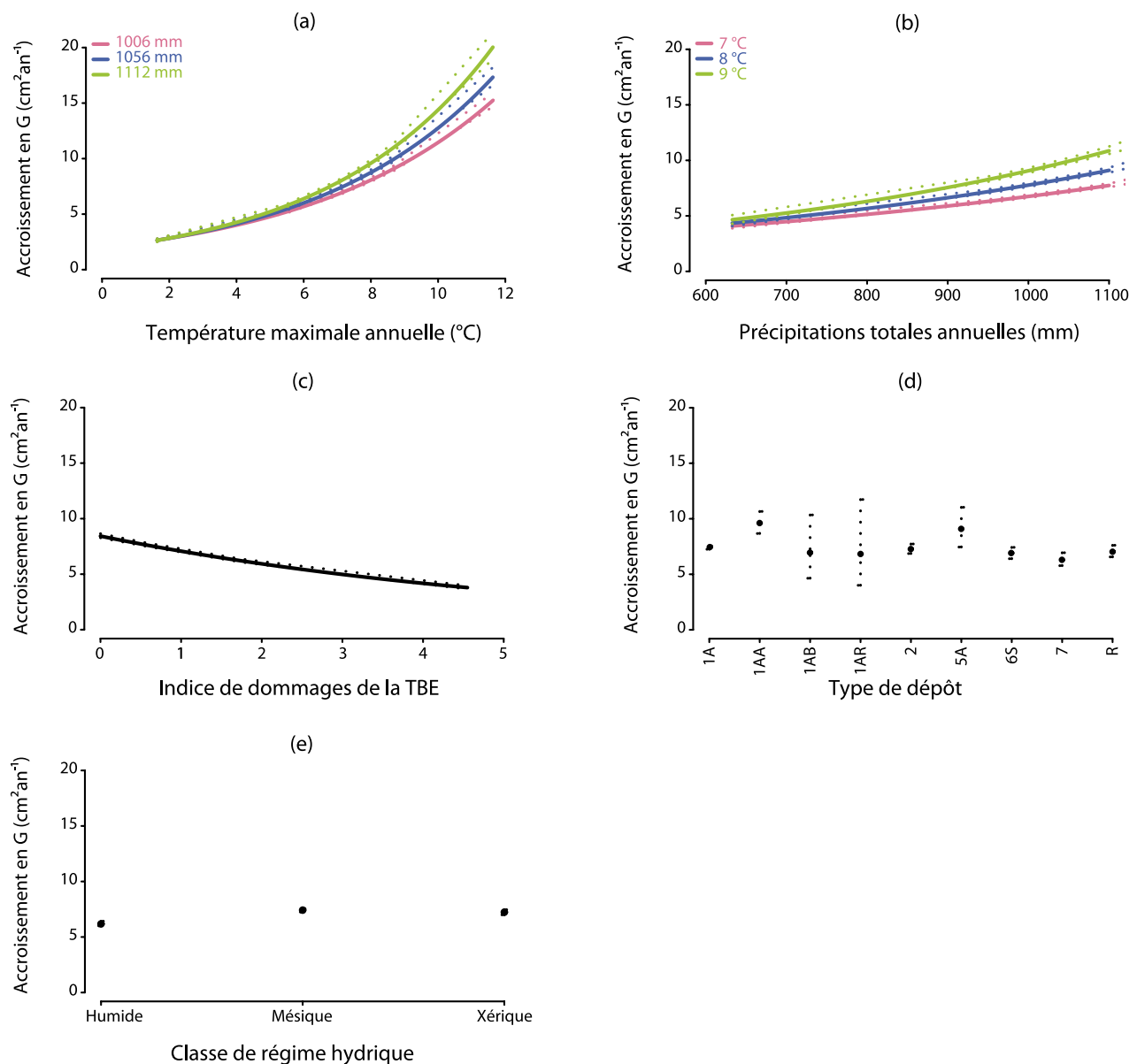


Figure 20. Prédiction de la croissance potentielle du sapin baumier (SAB) en fonction de la température maximale annuelle (a), des précipitations totales annuelles (b), de l'indice de dommages de la TBE (c) du type de dépôt de surface (d) et du régime hydrique des sols (e). Sur les graphiques, sont indiqués les estimations (ligne continue ou points pleins) et les intervalles de confiance à 95 % (lignes pointillées). Les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

2.2.3.14 Le thuya occidental

Parmi les variables étudiées, seul le régime hydrique des sols influence la croissance potentielle en surface terrière du THO (Figure 21). Plus l'écoulement de l'eau dans les sols est rapide, moins le potentiel de croissance est élevé; la différence entre les conditions extrêmes est de l'ordre de 10 %.

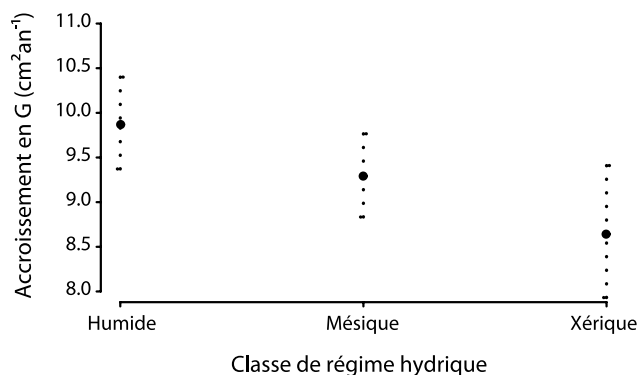


Figure 21. Prévion de la croissance potentielle du thuya occidental (THO) en fonction du régime hydrique des sols. Sur le graphique, sont indiqués l'estimation (points pleins) et l'intervalle de confiance à 95 % (lignes pointillées). Les covariables de référence sont indiquées au tableau 8.

Chapitre trois

Discussion

3.1 Qualité des modèles

La qualité d'ajustement des modèles est généralement bonne, à l'exception du modèle du groupe des ARi. En effet, la proportion de variance qu'ils expliquent ($R^2 = 0,14$ à $0,58$; Tableau 6) est comparable à celle des modèles d'accroissement en surface terrière de tiges individuelles récemment développés en Ontario par POKHAREL et FROESE (2009), en Norvège par ANDREASSEN et TOMTER (2003) ou en Europe par LAUBHANN *et al.* (2009). ANDREASSEN et TOMTER (2003) ont modélisé l'accroissement en surface terrière de l'épinette de Norvège, du pin d'Écosse, des bouleaux et de façon générique, de l'ensemble des espèces feuillues ou même, de toutes les espèces, en fonction de différentes variables biogéoclimatiques. Les R^2 des différents modèles qu'ils ont étalonnés varient de $0,26$ pour les bouleaux à $0,55$ pour l'épinette de Norvège. Ceux de l'étude de LAUBHANN *et al.* (2009), également construits à partir de variables biogéoclimatiques, varient de $0,33$ pour le bouleau commun à $0,42$ pour les chênes. Ces études, bien que similaires quant à leurs objectifs, divergent de la nôtre par les espèces et l'environnement dans lequel elles croissent. L'étude de POKHAREL et FROESE (2009) est davantage comparable à la présente étude, puisque ces auteurs ont modélisé l'accroissement en surface terrière de l'EPN, du PET, du PIG et du SAB, quatre des dix espèces principales que nous avons étudiées. Si l'on classe ces espèces en fonction du coefficient de détermination des modèles de prédiction, l'ordre est le même dans les deux études; le R^2 du SAB est plus élevé que celui de l'EPN, qui est lui-même égal ou très similaire à celui du PIG, lui-même plus élevé que celui du PET. Par contre, les modèles développés en Ontario semblent être moins précis que ceux développés dans cette étude, comme en témoignent des *REQM* plus élevés.

3.2 Effets des caractéristiques biogéoclimatiques

3.2.1 Caractéristiques initiales des peuplements

Le diamètre moyen quadratique initial est la seule variable qui, seule ou en interaction avec une autre variable, a été retenue dans tous les modèles développés. Il s'agit sûrement de la variable la plus fortement corrélée à la croissance, puisqu'elle a été retenue dans plus de 99 % des modèles testés pour toutes les espèces ou groupes d'espèces, à l'exception du groupe des ARi et du PIG (Tableau 6).

À l'exception des périodes juvénile et de sénescence, il est bien connu que la croissance en surface terrière des arbres augmente linéairement en fonction de leur diamètre, pour culminer vers une asymptote (PHIPPS et WHITTON 1988, LEBLANC 1990, DUCHESNE *et al.* 2003). La physiologie de la tige et l'évolution des processus physiologiques qui influencent la capacité de l'arbre à fabriquer de la biomasse sont à la base de cette relation. Cette dernière est très générale et se retrouve dans la plupart des modèles de croissance en surface terrière à l'échelle de l'arbre développés dans tous les pays (ASSMANN 1970).

Une augmentation de la compétition, indirectement mesurée par la surface terrière totale du peuplement, entraîne une diminution de l'accroissement en surface terrière des tiges individuelles et ce, pour toutes les espèces ou tous les groupes d'espèces à l'exception du PIG et des ARi, pour lesquels elle n'a aucune influence significative. Là encore, cette relation entre la compétition et la croissance était prévisible, car le phénomène est très bien documenté en sylviculture (ASSMANN 1970). D'ailleurs, des mesures reflétant la compétition entre les tiges sont généralement intégrées aux modèles d'accroissement à l'échelle de l'arbre (STAGE 1973, MONSERUD et STERBA 1996, FORTIN et LANGEVIN 2010). Toutefois, l'influence de la compétition sur la croissance des arbres varie selon les espèces. Dans notre étude, la croissance de l'EPN, une espèce plus septentrionale, semble être moins touchée par la compétition que celle des espèces plus méridionales, comme l'ERS, le SAB ou l'EPB (Figure 8b). En effet, la croissance potentielle des tiges d'EPN varie très peu en fonction de la surface terrière totale de la parcelle.

3.2.2 Impact de la dernière épidémie de TBE

Au Québec, de 1971 à 1981, la TBE a occasionné annuellement la défoliation de près de 20 millions d'hectares de forêt commerciale (BORDELEAU *et al.* 1989). Près de 50 % du territoire forestier a été touché au cours de cette période épidémique (BOULET 1989), qui a grandement contribué au changement de composition de la forêt québécoise. Durant cette période, la TBE a détruit de 139 à 238 millions de m^3 de sapins et d'épinettes en forêt publique (VÉZINA 1985). Cela a alors permis aux espèces de début de succession et les espèces compagnes non vulnérables à la TBE, qu'on retrouve dans les peuplements mixtes, de proliférer (DUCHESNE et OUMET 2008, MRNF

2009). À l'échelle du Québec, les peuplements mixtes représentaient alors près de 50 % de la superficie aux prises avec l'épidémie (MRNF 2009). Des études récentes ont d'ailleurs mis en évidence le rôle de la TBE dans la dynamique des peuplements mixtes (BOUCHARD *et al.* 2005, 2006). Les résultats de la présente étude confirment l'effet négatif de la TBE sur la croissance en surface terrière du SAB, de l'EPN, de l'EPB et du groupe des ART. À l'inverse, en période épidémique, la croissance du BOJ, du BOP et de l'ERS augmente en fonction de la sévérité de l'épidémie. Ces résultats confirment, une nouvelle fois, l'influence majeure des perturbations naturelles sur la dynamique des écosystèmes forestiers québécois (SAUCIER 1997).

3.2.3 Facteurs édaphiques

Le type de dépôt de surface influence la croissance potentielle des deux groupes d'espèces feuillues (AFi et Aft) et celle de quatre espèces individuelles, soit le BOP, le PET, l'EPN et le SAB. Il s'agit des quatre espèces les plus importantes au Québec, pour ce qui est du volume marchand. Leur importante distribution suggère qu'elles peuvent coloniser de vastes territoires constitués de divers types de dépôt de surface (organique, rocheux, glaiseux, etc.) (BURNS et HONKALA 1990). Les dépôts organiques et, dans une moindre mesure, les affleurements rocheux sont généralement les moins favorables à leur croissance.

L'épaisseur du dépôt de surface influence significativement la croissance potentielle de l'EPB, l'ERR et de manière moins importante, celle du PET et du groupe des Aft. Pour l'EPB et l'ERR, la croissance est largement supérieure sur les dépôts épais, comparativement aux dépôts très minces. La profondeur de l'enracinement ainsi que la disponibilité en eau et en éléments nutritifs pourraient expliquer la relation positive entre l'épaisseur du dépôt et la croissance potentielle de ces espèces.

Avec les données utilisées, il n'a pas été possible de mettre en évidence un effet du régime hydrique sur la croissance potentielle de l'EPB, de l'ERS, des ARI, des AFi et des ART. La croissance de l'ERR, du PET et du THO est meilleure sur les sites humides, celle du PIG est meilleure sur les sites xériques, alors que le BOJ, le BOP, l'EPN, les Aft et le SAB se développent mieux sur les sites mésiques. Il est bien connu que la croissance du PET est généralement faible sur les sols sableux, étant donné la faible disponibilité en eau et en élément nutritifs (STROTHMANN et ZASADA 1965). À l'opposé, le PIG peut se développer sur des sols sablonneux ou graveleux, là où d'autres espèces ne peuvent survivre (RUDOLPH et LAIDL 1990). Les résultats de cette étude suggèrent eux aussi que ces deux essences de succession en forêt boréale possèdent

des niches édaphiques distinctes; le PET est plus productif sur les sites humides, alors que le PIG pousse mieux sur les sites xériques.

3.2.4 Facteurs climatiques

Jusqu'à présent, peu d'études ont documenté l'influence de la variabilité spatiale du climat sur la croissance des principales espèces d'arbres au Québec. À partir de l'information tirée de près de 7000 placettes du réseau de placettes temporaires d'inventaire, UNG *et al.* (2001) ont démontré qu'il était possible de dériver un IQS pour l'EPN et le SAB à partir, entre autres, des degrés-jours de croissance, du déficit de pression de vapeur, d'un indice d'aridité et des précipitations totales annuelles. Ces mêmes auteurs affirment que la qualité de station du PET dépend principalement des degrés-jours de croissance et de l'indice d'aridité, alors que pour le BOP, la qualité de station est principalement influencée par les degrés-jours de croissance et les précipitations. Similairement, HAMEL *et al.* (2004) ont aussi rapporté que l'IQS de 32 peuplements d'EPN et de 27 peuplements de PIG était positivement corrélé aux degrés-jours de croissance. Par ailleurs, suite à l'étude de la dynamique contemporaine de 147 peuplements situés à la limite nordique de la forêt sous aménagement, DUCHESNE et OUMET (2009) ont démontré qu'à l'échelle du peuplement, la croissance de l'EPN ou celle du SAB était positivement influencée par la température et les précipitations. D'autres auteurs ont documenté l'influence du climat sur la variabilité interannuelle associée à la croissance radiale des principales espèces de la forêt boréale (EPN, SAB, PET, BOP, PIG), par l'intermédiaire d'analyses dendroclimatiques réalisées le long d'un gradient latitudinal (HOFGAARD *et al.* 1999, HUANG *et al.* 2010, LAPOINTE-GARANT *et al.* 2010). Par ailleurs, ROSSI *et al.* (2011) ont utilisé des analyses cellulaires pour documenter précisément la phénologie de la formation des cernes de croissance le long d'un gradient climatique. À notre connaissance, la présente étude est la première à documenter, à l'échelle du Québec méridional, l'influence de la variabilité spatiale du climat sur la croissance potentielle des principales espèces forestières.

Les résultats indiquent que la température influence la croissance potentielle de sept espèces, soit le BOJ, le BOP, l'EPN, l'ERR, le PET, le PIG et le SAB, ainsi que celle du groupe des AFi. La température influence donc la croissance des trois espèces résineuses les plus abondantes sur le territoire québécois (ensemble, ces espèces représentent 86 % du volume marchand résineux sur pied de la forêt publique sous aménagement; MRNF 2009) et de quatre des cinq espèces feuillues les plus importantes (ensemble, elles représentent 79 % du volume marchand feuillu; MRNF 2009).

L'ERS se distingue des autres espèces feuillues, car sa croissance ne semble pas être influencée de façon significative par la température. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que sa distribution est restreinte aux secteurs les plus méridionaux de la province, là où la température maximale est moins variable. En effet, lorsqu'on compare les placettes ayant servi à la modélisation de la croissance de l'ERS aux placettes d'espèces plus largement distribuées comme le SAB, on constate que le gradient de la température maximale annuelle est presque deux fois plus faible pour l'ERS (étendue des valeurs de 5,7 °C) que pour le SAB (étendue des valeurs de 10 °C). À cet égard, le THO est semblable à l'ERS, avec une étendue des valeurs de 6,3 °C, même si la différence avec le SAB est moins grande.

Par ailleurs, l'ERS, le THO et l'EPB sont trois espèces reconnues comme exigeantes d'un point de vue nutritionnel (BURNS et HONKALA 1990). Pour celles-ci, il semble que d'autres facteurs comme la fertilité des sols influencent la croissance potentielle de manière prépondérante.

Notons que l'influence de la température sur la croissance est positive pour toutes les espèces et groupes d'espèces, à l'exception du BOJ dont la croissance est inversement proportionnelle à la température de l'air. Ceci corrobore les connaissances sur l'autécologie du BOJ, qui est connu pour avoir une meilleure performance dans les milieux frais et où les précipitations sont abondantes (ERDMANN 1990).

Les précipitations influencent la croissance potentielle de six espèces, soit le BOJ, l'EPN, l'ERR, l'ERS, le PET et le SAB, ainsi que celle du groupe des ART. Elles favorisent la croissance du BOJ, de l'EPN, du PET et du SAB. En revanche, elles défavorisent celle de l'ERR, l'ERS et des ART, qui sont tous plus abondants dans le sud-ouest de la province, là où les précipitations sont plus faibles et la température plus élevée. L'influence positive des précipitations sur la croissance de l'EPN et du SAB au Québec a été démontrée à partir d'analyses des variations journalières de la croissance radiale mesurée par des dendromètres électroniques (DESLAURIERS *et al.* 2003, DUCHESNE et HOULE 2011, TURCOTTE *et al.* 2011). Par ailleurs, des analyses dendroclimatologiques ont démontré l'influence positive des précipitations sur la croissance du PET (HUANG *et al.* 2010). Le BOJ est aussi connu comme une espèce favorablement influencée par les précipitations (ERDMANN 1990). À l'inverse, celles-ci semblent avoir un effet négatif sur la croissance des deux espèces d'érable, mais leur influence est plutôt faible (de l'ordre de 10 % de différence de croissance entre les sites les plus secs et les plus pluvieux). Tout comme pour la température, la

croissance de certaines espèces (BOP, EPB, AFi, AFT, FIG, ARi, ART et THO) ne semble pas influencée par les précipitations. Cette absence de relation peut être due au fait que ces espèces ou groupes d'espèces occupent un territoire restreint en matière de gradient de pluviométrie, ou encore, au fait que d'autres facteurs, non pris en compte dans cette étude, comme la fertilité des sols, influencent leur croissance de manière prépondérante.

Les simulations climatiques projettent, à l'horizon 2090, un réchauffement médian de la température de l'ordre de 3,5 °C ($\pm 0,44$ °C) et une augmentation des précipitations pour le sud du Québec de 0 à 5 %. Les valeurs pour la portion centre et nord du Québec, quant à elles, sont associées à des augmentations projetées de 5 à 15 % durant la saison de croissance (LOGAN *et al.* 2011). Dans ce contexte, on peut penser que la croissance du BOJ pourrait diminuer sur les sites actuellement occupés, tout au moins dans la partie la plus méridionale de son aire de répartition actuelle. À l'inverse, la croissance du BOP, de l'EPN, de l'ERR, du PET, du FIG et du SAB pourrait s'améliorer dans les années à venir, tel que prédit par de nombreux auteurs pour plusieurs espèces (BROOKS *et al.* 1998, GOLDBLUM et RIGG 2005, BRICENO-ELIZONDO *et al.* 2006, FAN *et al.* 2009, LAUBHANN *et al.* 2009, ISE et MOORCROFT 2010, NISHIMURA et LAROQUE 2011).

3.2.5 Autres facteurs pouvant expliquer les variations de croissance

Dans la présente étude, nous nous sommes consacrés à documenter l'influence des variables biogéoclimatiques dont l'information pouvait être cartographiable à l'échelle du polygone écoforestier, afin de cartographier la croissance potentielle des arbres sur l'ensemble du territoire forestier. Selon l'espèce considérée, les variables indépendantes permettent d'expliquer de 14 à 58 % de la variance associée à la croissance potentielle. Conséquemment, une part importante de la variance associée à la croissance demeure inexpliquée.

La température maximale annuelle et les précipitations totales annuelles sont les deux variables climatiques retenues pour expliquer le gradient climatique. Toutefois, certains événements climatiques extrêmes, non considérés dans le présent exercice, peuvent aussi avoir des effets marqués sur la croissance des arbres. Par exemple, pour le SAB, il a été démontré qu'un coup de chaleur provoqué par une courte période sans pluie, pendant laquelle la température, la radiation solaire et l'humidité de l'air sont particulièrement élevées, peut entraîner une fin hâtive de la saison de croissance (DUCHESNE et HOULE 2011). Le verglas de 1998 et le dégel hivernal de février 1981 sont d'autres exemples d'événements climatiques

extrêmes qui ont eu une influence considérable sur la croissance des arbres (PAYETTE *et al.* 1996, DUCHESNE *et al.* 2002, PISARIC *et al.* 2008).

D'autres facteurs non climatiques peuvent également influencer significativement la croissance des arbres. Plusieurs études ont démontré l'effet de la disponibilité en éléments nutritifs et de la texture du sol sur la croissance des arbres au Québec. Par exemple, MARQUIS et PARÉ (2009) ont démontré que la combinaison de la géochimie et de la texture de la roche-mère permet de prédire l'IQS des plantations de pin gris âgées de 16 à 18 ans. UNG *et al.* (2001) ont aussi démontré que, par son influence sur la capacité de rétention en eau, la texture du sol permet de prédire l'IQS des principales espèces de la forêt boréale (SAB, EPN, PET, BOP). De façon similaire, HAMEL *et al.* (2004) ont démontré que la chimie du sol explique une part significative de la variance associée à l'IQS de l'EPN et du PIG. Pour les espèces feuillues, DUCHESNE *et al.* (2002) ont démontré que la croissance en surface terrière de l'érable à sucre est influencée par l'acidité du sol.

En plus des caractéristiques du sol, l'historique de perturbations ainsi que la structure et la composition du peuplement peuvent aussi avoir une influence sur la croissance des arbres individuels. Par exemple, LECOMTE *et al.* (2006) ont démontré que les peuplements d'EPN qui tirent leur origine d'un brûlis peu sévère sont caractérisés par une faible régénération et une faible croissance en diamètre après feu.

Au contraire, après un feu sévère, on observe une installation rapide d'un peuplement dense et productif. Ces différences semblent être associées au phénomène de paludification qui touche particulièrement les pessières noires mal drainées établies sur la plaine argileuse de l'Abitibi (FENTON *et al.* 2005). Par l'étude de la croissance des tiges de 18 peuplements situés à la limite de la forêt continue, ROSSI *et al.* (2009) ont démontré que la croissance en diamètre et en hauteur de l'EPN dans les peuplements de structure équiennne était le double de celle dans les peuplements de structure inéquiennne. Finalement, suite à l'étude d'une douzaine de peuplements, LÉGARÉ *et al.* (2005) ont suggéré que la présence du PET dans un peuplement influence la productivité de l'EPN.

Conséquemment, la considération de variables actuellement non cartographiables permettrait sans doute d'accroître le pouvoir prédictif des modèles de croissance à l'échelle de la tige. Toutefois, bien qu'ils amélioreraient notre compréhension des principales variables qui régissent la croissance des arbres, les modèles ainsi obtenus pourraient difficilement être utilisés dans le cadre de la planification forestière. Néanmoins, ce type d'analyse nous permettrait de mieux connaître les divers facteurs qui régissent la croissance des principales espèces forestières au Québec, et de cibler, notamment, de nouvelles variables à mesurer lors des inventaires forestiers afin d'améliorer la qualité des prédictions de croissance.

Conclusion

Dans cette étude, nous avons étalonné des modèles linéaires mixtes pour prévoir la croissance potentielle en surface terrière des dix espèces les plus abondantes de la forêt commerciale du Québec, ainsi que de quatre groupes d'espèces. À l'exception du groupe des ARi, les coefficients de variation varient de 0,27 (PET) à 0,58 (groupe des AFi), tandis que la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne varie de 17 % (groupe des ARt) à 35 % (BOP, EPN, PIG). Par ailleurs, la validation des modèles a démontré que les biais de prédiction sont négligeables à l'échelle provinciale.

En plus des principales variables de peuplement, la grande majorité des modèles intègrent des variables climatiques. Certains intègrent également des variables édaphiques, la plus courante étant le type de régime hydrique. Enfin, la croissance de la moitié des espèces étudiées se module en fonction de la sévérité de la dernière épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette.

Ces modèles de croissance potentielle ont été adaptés pour être utilisés dans le cadre de l'exercice ministériel d'identification des aires d'intensification de production ligneuse (AIPL), notamment dans les peuplements de structure inéquienne, où la notion d'IQS définie par une hauteur donnée à 50 ans ne s'applique pas.

Bien que la précision de la majorité de ces modèles soit jugée satisfaisante, car comparable à d'autres modèles développés ailleurs dans le

monde, il n'en demeure pas moins que l'ajout d'autres variables, notamment celles qui qualifieraient la fertilité des sites, permettrait de les améliorer. En effet, selon les espèces, force est de constater que plus de 40 % de la variance de la croissance potentielle n'est expliquée par aucun des facteurs étudiés. Il en existe donc d'autres qui, seuls ou en combinaison, expliquent les différences de croissance d'une espèce donnée en un lieu ou un autre. L'identification de ces facteurs permettra d'améliorer la qualité prédictive des modèles de croissance et de mieux cibler les sites les plus favorables à la croissance de chaque espèce ou groupes d'espèces.

Les modèles de croissance développés dans la présente étude permettront de préciser le potentiel sylvicole de chaque station forestière pour une espèce donnée. Dès lors, les aménagistes pourront proposer des traitements sylvicoles mieux adaptés aux capacités intrinsèques de croissance des sites sur lesquels poussent ces espèces, et préciser les hypothèses de rendement formulées dans le cadre du calcul stratégique qui vise à déterminer la possibilité annuelle de coupe.

Cette étude se limite à l'analyse de l'influence des facteurs biogéoclimatiques cartographiables sur la croissance des espèces. Pour parfaire notre connaissance de l'autécologie des espèces, des études adressant à la fois l'influence des caractéristiques biogéoclimatiques sur leur croissance, leur abondance et leur répartition seraient également souhaitables.

Références bibliographiques

- ANDREASSEN, K. et S.M. TOMTER, 2003. *Basal area growth models for individual trees of Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in Norway*. For. Ecol. Manage. 180 : 11-24.
- ASSMANN, E., 1970. *The principles of forest yield study*. Pergamon Press, Oxford. 506 p.
- AUGER, I., M. FORTIN, D. POTHIER et J.-P. SAUCIER, 2011. *Une nouvelle génération de modèles de prévision pour les forêts du Québec*. Stand thématique présenté au Carrefour Forêt Innovations 2011. Octobre 2011. Québec. http://www.carrefourforet-innovations.gouv.qc.ca/recherche/crf_affichage_detail.asp?projet=7374.
- AUSTIN, P.C. et J.V. TU, 2004. *Bootstrap methods for developing predictive models*. Am. Stat. 58 : 131-137.
- BÉDARD, S., S. MEUNIER, L. BLAIS et Z. MAJCEN, 2004. *Les effets réels des coupes de jardinage dans les forêts publiques du Québec de 1995 à 1998*. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 483. 50 p.
- BORDELEAU, C., D. GUÉRIN, L. INNES, D. LACHANCE et R. PICHER, 1990. *Insectes et maladies des arbres Québec -1989*. Forêt Conservation 56, supplément. 32 p.
- BOUCHARD, M., D. KNEESHAW et Y. BERGERON, 2005. *Mortality and stand renewal patterns following the last spruce budworm outbreak in mixed forests of western Quebec*. For. Ecol. Manage. 204 : 297-313.
- BOUCHARD, M., D. KNEESHAW et Y. BERGERON, 2006. *Forest dynamics after successive spruce budworm outbreaks in mixedwood forests*. Ecology 87 : 2319-2329.
- BOULET, B., 1989. *Histoire des épidémies d'insectes en milieu forestier*. Forêt Conservation 56 : A1-A4.
- BRICENO-ELIZONDO, E., J. GARCIA-GONZALO, H. PELTOLA, J. MATALA et S. KELLOMÄKI, 2006. *Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to climate change and forest management in boreal conditions*. For. Ecol. Manage. 232 : 152-167.
- BROOKS, J.R., L.B. FLANAGAN et J.R. EHLENGER, 1998. *Responses of boreal conifers to climate fluctuations: indications from tree-ring widths and carbon isotope analyses*. Can. J. For. Res. 28 : 524-533.
- BURNS, R.M. et B.H. HONKALA, tech. coords, 1990. *Silvics of North America: 1. Conifers; 2. Hardwoods* Agriculture Handbook No. 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. 877 p. http://www.na.fs.fed.us/spfo/pubs/silvics_manual/table_of_contents.htm.
- CAJANDER, A.K., 1926. *The theory of forest types*. Acta For. Fenn. 29 : 1-108.
- CHEN, H.Y.H., P.V. KRESTOV et K. KLINKA, 2002. *Trembling aspen site index in relation to environmental measures of site quality at two spatial scales*. Can. J. For. Res. 32 : 112-119.
- COMMISSION D'ÉTUDE SUR LA GESTION DE LA FORÊT PUBLIQUE QUÉBÉCOISE, 2004. *Rapport*. Bibliothèque nationale du Québec. 307 p.
- DESLAURIERS, A., H. MORIN et Y. BEGIN, 2003. *Cellular phenology of annual ring formation of Abies balsamea in the Quebec boreal forest (Canada)*. Can. J. For. Res. 33 : 190-200.
- DUCHESNE, L. et D. HOULE, 2011. *Modelling day-to-day stem diameter variation and annual growth of balsam fir (Abies balsamea (L.) Mill.) from daily climate*. For. Ecol. Manage. 262 : 863-872.
- DUCHESNE, L. et R. OUMET, 2008. *Population dynamics of tree species in southern Quebec, Canada: 1970-2005*. For. Ecol. Manage. 255 : 3001-3012.
- DUCHESNE, L. et R. OUMET, 2009. *Relationships between structure, composition, and dynamics of the pristine northern boreal forest and air temperature, precipitation, and soil texture in Quebec (Canada)*. Int. J. For. Res. 2009 : 13 p. doi : 10.1155/2009/398389.
- DUCHESNE, L., R. OUMET et D. HOULE, 2002. *Basal area growth of sugar maple in relation to acid deposition, stand health and soil nutrients*. J. Environ. Qual. 31 : 1676-1683.
- DUCHESNE, L., R. OUMET et C. MORNEAU, 2003. *Assessment of sugar maple health based on basal area growth pattern*. Can. J. For. Res. 33 : 2074-2080.
- ERDMANN, G.G., 1990. *Yellow birch (Betula alleghaniensis Britton)*. Dans : H.A. Fowells (éd.). *Silvics of forest trees of the United States*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 271, Washington, DC. p. 133-147.

- FAN, Z.-X., A. BRÄUNING, K.-F. CAO et S.-D. ZHU, 2009. *Growth-climate responses of high-elevation conifers in the central Hengduan Mountains, southwestern China*. For. Ecol. Manage. 258 : 306-313.
- FENTON, N., N. LECOMTE, S. LEGARE et Y. BERGERON, 2005. *Paludification in black spruce (Picea mariana) forests of eastern Canada: Potential factors and management implications*. For. Ecol. Manage. 213 : 151-159.
- FORTIN, M. et L. LANGEVIN, 2010. *ARTÉMIS-2009 : un modèle de croissance basé sur une approche par tiges individuelles pour les forêts du Québec*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 156. 48 p.
- GOLDBLUM, D. et L.S. RIGG, 2005. *Tree growth response to climate change at the deciduous-boreal forest ecotone, Ontario, Canada*. Can. J. For. Res. 35 : 2709-2718.
- GUILLEMETTE, F., S. MEUNIER, M.-C. LAMBERT et S. BÉDARD, 2009. *Effets réels quinquennaux des coupes partielles pratiquées de 1995 à 1999 dans des érablières*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Rapport hors-série. 56 p.
- HÄGGLUND, B., 1981. *Evaluation of forest site productivity*. For. Abstr. 42 : 515-527.
- HAMEL, B., N. BÉLANGER et D. PARÉ, 2004. *Productivity of black spruce and jack pine stands in Quebec as related to climate, site biological features and soil properties*. For. Ecol. Manage. 191 : 239-251.
- HOFGAARD, A., J. TARDIF et Y. BERGERON, 1999. *Dendroclimatic response of Picea mariana and Pinus banksiana along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest*. Can. J. For. Res. 29 : 1333-1346.
- HUANG, J., J. TARDIF, Y. BERGERON, B. DENNELER, F. BERNINGER et M. GIRARDIN, 2010. *Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest*. Global Change Biol. 16 : 711-731.
- ISE, T. et P. MOORCROFT, 2010. *Simulating boreal forest dynamics from perspectives of ecophysiology, resource availability, and climate change*. Ecol. Res. 25 : 501-511.
- KANTAVICHAI, R., D. BRIGGS et E. TURNBLOM, 2010. *Modeling effects of soil, climate, and silviculture on growth ring specific gravity of Douglas-fir on a drought-prone site in Western Washington*. For. Ecol. Manage. 259 : 1085-1092.
- LAPOINTE-GARANT, M.P., J.G. HUANG, G. GEA-IZQUIERDO, F. RAULIER, P. BERNIER et F. BERNINGER, 2010. *Use of tree rings to study the effect of climate change on trembling aspen in Quebec*. Global Change Biol. 16 : 2039-2051.
- LAUBHANN, D., H. STERBA, G.J. REINDS et W. DE VRIES, 2009. *The impact of atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: An individual tree growth model*. For. Ecol. Manage. 258 : 1751-1761.
- LEBLANC, D.C., 1990. *Relationships between breast-height and whole-stem growth indices for red spruce on Whiteface Mountain, New York*. Can. J. For. Res. 20 : 1399-1407.
- LECOMTE, N., M. SIMARD, N. FENTON et Y. BERGERON, 2006. *Fire severity and long-term ecosystem biomass dynamics in coniferous boreal forests of eastern Canada*. Ecosystems 9 : 1215-1230.
- LÉGARE, S., Y. BERGERON et D. PARÉ, 2005. *Effect of aspen (Populus tremuloides) as a companion species on the growth of black spruce (Picea mariana) in the southwestern boreal forest of Quebec*. For. Ecol. Manage. 208 : 211-222.
- LOGAN, T., I. CHARRON, D. CHAUMONT et D. HOULE, 2011. *Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise*. Ouranos et ministère des Ressources naturelles et de la Faune. http://www.ouranos.ca/media/publication/162_AtlasForet2011.pdf. 55 p. + annexes.
- MARQUIS, F. et D. PARÉ, 2009. *The role of permanent site factors in the assessment of soil treatment effects: a case study with a site preparation trial in jack pine plantations on glacial outwashes*. Can. J. Soil Sci. 89 : 81-91.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES, 1994. *Le point d'observation écologique*. Saucier, J.-P. (éd.). Direction de la gestion des stocks forestiers, Service des inventaires forestiers. RN94-3078. 116 p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE (MRNF), 2009. *Le portrait de l'évolution de la forêt publique sous aménagement du Québec méridional des années 1970 aux années 2000*. 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.

- MONSERUD, R.A., 1984. *Problems with site index: an opinionated review*. Dans : J. Bockheim (éd.). *Symposium on forest land classification: Experiences, problems, perspectives*. University of Wisconsin, Madison, USA, Department of Soil Science. p. 167–180.
- MONSERUD, R.A. et H. STERBA, 1996. *A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria*. For. Ecol. Manage. 80 : 57-80.
- MONSERUD, R.A., Y. YANG, S. HUANG et N. TCHEBAKOVA, 2008. *Potential change in lodgepole pine site index and distribution under climatic change in Alberta*. Can. J. For. Res. 38 : 343-352.
- NISHIMURA, P.H. et C.P. LAROCQUE, 2011. *Observed continuity in radial growth-climate relationships in a twelve site network in western Labrador, Canada*. Dendrochronologia 29 : 17-23.
- PAYETTE, S., A. DELWAIDE, C. MORNEAU et C. LAVOIE, 1996. *Patterns of tree stem decline along a snow-drift gradient at treeline: A case study using stem analysis*. Can. J. Bot. 74 : 1671-1683.
- PERRON, J.-Y., G. BLAIS, L. BLAIS, J.P. CARPENTIER, J. CLOUTIER, B. DEL DEGAN, D. DEMERS, R. GAGNON, J.P. LÉTOURNEAU, P. MORIN et Y. RICHARD, 2009. *Dendrométrie et inventaire forestier*. Dans : *Manuel de foresterie*. Éditions Multimondes, Québec. p. 390-473.
- PHIPPS, R.L. et J.C. WHITTON, 1988. *Decline in long-term growth trends of white oak*. Can. J. For. Res. 18 : 24–32.
- PISARIC, M.F.J., D.J. KING, A.J.M. MACINTOSH et R. BEMROSE, 2008. *Impact of the 1998 ice storm on the health et growth of sugar maple (Acer saccharum Marsh.) dominated forests in Gatineau Park, Quebec*. J. Torrey Bot. Soc. 135 : 530-539.
- POKHAREL, B. et R.E. FROESE, 2009. *Representing site productivity in the basal area increment model for FVS-Ontario*. For. Ecol. Manage. 258 : 657-666.
- POTHIER, D. et I. AUGER, 2011. *NATURA-2009 : un modèle de prévision de la croissance à l'échelle du peuplement pour les forêts du Québec*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 163. 76 p.
- POTHIER, D. et D. MAILLY, 2006. *Stand-level prediction of balsam fir mortality in relation to spruce budworm defoliation*. Can. J. For. Res. 36 : 1631-1640.
- POTHIER, D., D. MAILLY et S. TREMBLAY, 2005. *Predicting balsam fir growth reduction caused by spruce budworm using large-scale historical records of defoliation*. Ann. For. Sci. 62 : 261-267.
- RÉGNIERE, J. et R. ST-AMANT, 2006. *Stochastic simulation of daily air temperature and precipitation from monthly normals in North America north of Mexico*. Int. J. Biometeorol. 51 : 415-430.
- ROSE, A.H. et G.H. LINDQUIST, 1977. *Insectes des épinettes, du sapin et de la pruche de l'est du Canada*. Ministère des Approvisionnements et Services Canada. Ottawa, Canada. 159 p.
- ROSSI, S., H. MORIN, A. DESLAURIERS et P.Y. PLOURDE, 2011. *Predicting xylem phenology in black spruce under climate warming*. Global Change Biol. 17 : 614-625.
- ROSSI, S., M.J. TREMBLAY, H. MORIN et G. SAVARD, 2009. *Growth and productivity of black spruce in even- and uneven-aged stands at the limit of the closed boreal forest*. For. Ecol. Manage. 258 : 2153-2161.
- RUDOLPH, T.D. et P.R. LAIDLAY, 1990. *Pinus banksiana Lamb. – Jack pine*. Dans : Burns, R.M. et B.H. Honkala (éd.). *Silvics of North America*. USDA Forest Service, Agricultural Handbook No. 654, Washington, DC. http://www.na.fs.fed.us/spfo/pubs/silvics_manual/Volume_1/pinus/banksiana.htm.
- SAUCIER, J.-P., 1997. *Modélisation de l'accroissement radial des quatre principales essences des peuplements mélangés de bouleau jaune et de résineux soumis à des perturbations naturelles (Québec)*. Thèse de doctorat, ENGREF, Laboratoire de recherche en Sciences forestières, Nancy, France. 206 p.
- SAS INSTITUTE, 2000. *SAS/STAT User's Guide, Version 8*. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- SNOWDON, P., 1991. *Ratio estimator for bias correction in logarithmic regressions*. Can. J. For. Res. 21 : 720-724.
- STAGE, A.R., 1973. *Prognosis model for stand development*. Res. Pap. INT-137, U.S. Dept. of Agriculture, Ogden, Utah. 32 p.
- STROTHMANN, R. et Z.A. ZASADA, 1965. *Quaking aspen (Populus tremuloides Michx.)*. Dans : Fowells, H.A. (éd.). *Silvics of forest trees of the United States*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 271, Washington, DC. p. 523-534.
- TURCOTTE, A., S. ROSSI, A. DESLAURIERS, C. KRAUSE et H. MORIN, 2011. *Dynamics of depletion and replenishment of water storage in stem and roots of black spruce measured by dendrometers*. Front. Plant Sci. 2 : 21 p. doi : 10.3389/fpls.2011.00021.
- UNG, C.-H., P.Y. BERNIER, F. RAULIER, R.A. FOURNIER, M.-C. LAMBERT et J. RÉGNIERE, 2001. *Biophysical site indices for shade tolerant and intolerant boreal species*. For. Sci. 47 : 83-95.

- VÉZINA, S., 1985. *Mise à jour des volumes de mortalité dus à l'épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette*. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. Service technique de l'aménagement. Rapport interne n° 56. 56 p.
- WANG, G.G., 1995. *White spruce site index in relation to soil, understory vegetation, and foliar nutrients*. Can. J. For. Res. 25 : 29-38.
- WANG, G.G. et K. KLINKA, 1996. *Use of synoptic variables in predicting white spruce site index*. For. Ecol. Manage. 80 : 95-105.
- WILDE, S. A., 1966. *Soil standards for planting Wisconsin conifers*. J. For. 66 : 389-391.
- ZON, R., 1913. *Quality classes and forest types*. Proceedings of the Society of American Foresters 8 : 100-104.

Annexe 1. Estimés des paramètres des modèles d'accroissement en surface terrière de chaque espèce ou groupe d'espèces. Les paramètres sont ceux des modèles étalonnés sur l'ensemble des données. La légende des abréviations des noms d'espèces et de groupes d'espèces est présentée aux tableaux 1 et 2, et celle des caractéristiques édaphiques est présentée au tableau 3

Effets	Espèce ou groupe d'espèces													
	BOJ	BOP	EPB	EPN	ERR	ERS	AFI	Aft	PET	PIG	ARI	Art	SAB	THO
Intercept	0,3465	-1,6358	0,08914	-4,1204	-1,2212	-0,1329	-6,1349	-1,5491	-1,6165	-1,1759	-1,1021	1,2732	-1,6676	-0,3231
log(dqj)	0,6604	0,7203	0,9311	3,6551	0,9534	1,0845	4,555	1,2874	0,7755	0,3283	1,0860	1,1084	1,2626	0,895
{log(dqj)} ²				-0,4957			-0,6928							
G	-0,01523	-0,02313	-0,0602	-0,00428	-0,01355	-0,0491	-0,1172	-0,0302	-0,01345			-0,04424	-0,04123	-0,04101
G ²			0,000729			0,000578		0,000334				0,000524	0,000508	
rwri	0,05496	0,07726	-0,1626	-0,08757		0,02715						-0,06675	-0,1756	
depotsurf														
1A		0,1484		0,1432			0,1481	0,3862	0,2216				0,04603	
1AA		0,09342		0,009988			0,3055	0,6997	0,4655				0,3077	
1AB		0,4708		0,2535			1,0595		0,5288				-0,01984	
1AR		-0,9232		0,04594					-0,05855				-0,03055	
2		-0,0344		0,1834			0,3326	0,4348	0,08099				0,03009	
5A		-0,2874		0,4248			0,2796	0,5707	0,08851				0,2491	
6S		-0,4077		0,485			-0,2318	0,5627	-0,00532				-0,02493	
7		-0,6433		-0,417			-0,4592	0,3243	-0,1522				-0,1102	
R	0	0		0			0	0	0				0	
epais depot			0		0			0	0					
absent à très mince														
très mince à mince			0,1622		0,177			-0,1458	-0,2065					
mince à épais			0,3886		0,3564			0	0					
reghyd														
humide	-0,1366	-0,2235		-0,4023	0,03598			-0,2582	0,08309	-0,2131			-0,1753	0,06105
mésique	0	0		0	0			0	0	0			0	0
xérique	-0,1125	-0,07167		0,05478	-0,1317			-0,1031	-0,1446	0,159			-0,02412	-0,07242
Tmax	-0,05844	0,2012		-0,2244	0,07214		0,1309		0,1407	0,2797			-0,09061	
PrecTot	0,000738			-0,00151	-0,0001	-0,00015			0,00072			-0,00141	-0,00049	

Annexe 1 (fin). Estimés des paramètres des modèles d'accroissement en surface terrière de chaque espèce ou groupes d'espèces. Les paramètres sont ceux des modèles étalonnés sur l'ensemble des données. La légende des abréviations des noms d'espèces et de groupes d'espèces est présentée aux tableaux 1 et 2, et celle des caractéristiques édaphiques est présentée au tableau 3

Effets	Espèce ou groupe d'espèces													
	BOJ	BOP	EPB	EPN	ERR	ERS	AFI	Aft	PET	PIG	ARI	ARt	SAB	THO
G*log(dqi)							0,03448							0,009578
G*reghyd	humide			0,007699										
	mésique			0										
	xérique			0,003866										
	1A	0,003346		-0,00643										
	1AA	0,01467		-0,00168										
G*depotsurf	1AB	-0,00456		-0,02298										
	1AR	0,0283		0,001592										
	2	0,008939		-0,01252										
	5A	0,04004		0										
	6S	0,01603		-0,0217										
Tmax*PrecTot	7	0,03541		0,01094										
	R	0		0										
				0,000396									0,000264	
	humide			0,01864										
	mésique			0										
Tmax*reghyd	xérique			-0,02707										
c†	1,10	1,14	1,16	1,11	1,14	1,13	1,12	1,14	1,13	1,11	1,20	1,09	1,12	1,10

† (c) facteur de correction du biais dû à la retransformation des prédictions sur l'échelle originale des données.



Les projets de modélisation de la croissance et du rendement menés par la Direction de la recherche forestière sont essentiels à un aménagement efficace des ressources forestières du Québec. L'identification des facteurs biogéoclimatiques cartographiables qui influencent le potentiel de croissance en diamètre des dix espèces d'arbres les mieux représentées au Québec, de même que celui de quatre groupes d'espèces moins abondantes, pourrait permettre d'améliorer la qualité prédictive des modèles de croissance, pour mieux cibler les sites les plus favorables à la croissance de chaque espèce ou groupe d'espèces.