

## **NOTE TO USERS**

**This reproduction is the best copy available**

**UMI**



STEVE BÉDARD

**L'estimation de la croissance potentielle des stations forestières basée sur  
l'information écologique : exemple du sous-domaine de la sapinière  
à bouleau jaune de l'Est-du-Québec**

Mémoire  
présenté  
à la Faculté des études supérieures  
de l'Université Laval  
pour l'obtention  
du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

Département des sciences du bois et de la forêt  
FACULTÉ DE FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE  
UNIVERSITÉ LAVAL

Octobre 1998



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file Votre référence*

*Our file Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-38010-6

## Résumé

La modélisation de la croissance à l'aide de la relation hauteur-âge, stratifiée par type écologique, a été réalisée afin de déterminer la croissance potentielle du sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.) et des épinettes noire et rouge (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P., *Picea rubens* Sarg.). Des comparaisons statistiques des courbes hauteur-âge entre les types écologiques ont permis de regrouper et de distinguer certains d'entre eux. Les résultats obtenus démontrent qu'il existe non seulement des différences de croissance entre les stations mais aussi entre les essences sur une même station. Malgré les différences observées entre les essences pour une même station, il a été possible de proposer cinq indices synthèses à partir des indices de qualité de station potentiels ( $IQS_{pot}$ ) exprimant la hauteur atteinte à l'âge de 50 ans sans contrainte de croissance. L'indice très élevé est associé aux stations des érablières à bouleau jaune et des sapinières à bouleau jaune, ayant des  $IQS_{pot}$  variant de 19,2 à 19,8 m; l'indice modéré à élevé à la station mésique de la sapinière à épinette rouge, ayant des  $IQS_{pot}$  de 16,4 à 17,2 m ; l'indice modéré aux stations xérique et hydrique des sapinières à épinette rouge et à thuya ayant des  $IQS_{pot}$  de 14,8 à 16,4 m ; l'indice faible à la station hydrique de la sapinière à thuya ayant des  $IQS_{pot}$  de 13,1 à 13,7 m et finalement l'indice très faible est associé à la station hydrique de la cédrière sur tourbe minérotrophe avec un  $IQS_{pot}$  de 11,1 m.

## Avant-propos

Ces travaux de recherche ont été rendus possibles grâce à la participation financière du ministère des Ressources naturelles du Québec et de l'aide technique des unités de gestion du Grand Portage et du Bas-Saint-Laurent du même ministère. Je tiens à remercier mon directeur, le professeur Jean Bégin et mon codirecteur le professeur Louis Bélanger pour leurs judicieux conseils pour la rédaction de ce manuscrit. Des remerciements particuliers s'adressent à M. Claude Lapointe qui a développé les programmes pour l'analyse statistiques des données. De plus, je tiens à remercier pour leur collaboration : MM. Paul Dorais, Pierre Grondin, Jean-Yves Perron, Jean-Pierre Saucier et Denis Thibault. Je désire également exprimer ma reconnaissance aux équipes de laboratoire et de terrain ; merci à Pierrot Boulay, Lise Beauséjour, Geneviève Constantis, Éric Daigle, Maurice Gagnon, Denis Hotte, Simon Moisan, Jean-Louis Morin, Dany Pineau, Bernard Rousseau, Gino St-Pierre, Arnold vanGheulwe. Enfin, je tiens à remercier MM. Jean-Pierre Carpentier et Richard Zarnovican pour leurs conseils.

## Table des matières

Résumé.....	i
Avant-propos.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des tableaux.....	iv
Liste des figures.....	v
Introduction.....	1
1. Matériel et méthodes.....	4
1.1 Localisation et description de la région étudiée.....	4
1.2 Classification écologique.....	5
1.3 Protocole dendrométrique.....	11
1.4 Traitement des données.....	12
1.4.1 Correction de l'âge des tiges.....	16
1.4.3 Description du modèle.....	21
2. Résultats et discussion.....	24
2.1 Courbes spécifiques par type écologique.....	24
2.2 Étude comparative des types écologiques.....	28
2.2.1 Épinette blanche.....	32
2.2.2 Épinettes noire et rouge.....	32
2.2.3 Sapin baumier.....	33
2.3 Comparaison des courbes obtenues avec les courbes de Ker et Bowling.....	34
2.4 Synthèse des résultats.....	36
2.5 Utilisations possibles des résultats.....	37
Conclusion.....	40
Références.....	41
Annexe A. Description des codes des dépôts de surface utilisés.....	47
Annexe B. Classes de drainage utilisées.....	48

## Liste des tableaux

Tableau 1. Groupes écologiques d'espèces (Grondin et <i>al.</i> , 1995b) .....	9
Tableau 2. Caractéristiques dendrométriques marchandes des placettes-échantillons.....	13
Tableau 3. Nombre de tiges par essence et par type écologique .....	14
Tableau 4. Statistiques descriptives de la hauteur à la fin de la période d'oppression.....	17
Tableau 5. Statistiques descriptives des tiges utilisées pour la modélisation.....	21
Tableau 6. $IQS_{pot}$ et coefficients de régression par type écologique.....	25
Tableau 7. Seuils observés des comparaisons des courbes hauteur-âge par type écologique .	29
Tableau 8. $IQS_{pot}$ et coefficients des courbes hauteur-âge par groupe de types écologiques ...	30
Tableau 9. Synthèse des résultats .....	38

## Liste des figures

Figure 1. Localisation du territoire d'étude et des placettes-échantillons. ....	8
Figure 2. Toposéquence et principales caractéristiques des types écologiques.....	10
Figure 3. Accroissements périodiques moyens en hauteur des espèces pour la période 1895 à 1995.....	15
Figure 4. Exemple de correction des courbes hauteur-âge de six sapins baumiers d'une même placette. ....	19
Figure 5. Exemple d'ajustement de la courbe hauteur-âge pour enlever la période d'oppression et la période associée une épidémie de TBÉ.....	20
Figure 6. Courbes hauteur-âge par type écologique. ....	27
Figure 7. Courbes hauteur-âge synthèses et indice de qualité de station potentiel. ....	31
Figure 8. Comparaison des courbes hauteur-âge synthèses à celles de Ker et Bowling (1991). ....	35

## Introduction

Le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune de l'Est couvre une superficie de 40 865 km<sup>2</sup> dans les régions du Bas-Saint-Laurent, de la ceinture du massif de la Gaspésie, de la vallée du Saguenay et de la cuvette du Lac-Saint-Jean (Saucier et *al.*, 1998). Les peuplements forestiers de cette zone de la forêt boréale mixte constituent une importante source de matière ligneuse pour l'industrie forestière. Malgré qu'ils soient parmi les plus productifs au Québec (MRNQ, 1994), les connaissances concernant la structure, la composition et le dynamisme de ces écosystèmes sont limitées (Conseil de la recherche forestière du Québec, 1995). Ces forêts ont été perturbées à maintes reprises par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* (Clem.)), (Blais et Martineau, 1960 ; Blais, 1983 ; Lachance et *al.*, 1990), et les activités de récolte forestière ont été importantes et souvent accélérées par les coupes de récupération des aires dévastées par cet insecte. Comme dans plusieurs autres régions forestières canadiennes, on a entrepris depuis quelques années un virage forestier important, passant d'une foresterie de récolte de la forêt vierge à une foresterie plus intensive axée sur la production d'une nouvelle matière ligneuse (Bélanger et *al.*, 1995). Dans ce contexte, un des besoins fondamentaux de l'aménagiste réside dans l'identification des stations forestières en fonction de leur potentiel de production. Cette connaissance de la forêt permettra : 1) une identification des stations forestières méritant une sylviculture plus intensive ; 2) un meilleur choix des objectifs d'aménagement et des essences que l'on veut favoriser dans les peuplements ; et 3) l'établissement d'un cadre nécessaire à l'élaboration de tables de production.

Pour connaître le potentiel de croissance d'une station forestière, l'indice de qualité de station (IQS) est la mesure dendrométrique la plus utilisée (Carmean, 1975 ; Spurr et Barnes, 1980). Cet indice est déterminé à partir de la hauteur dominante atteinte à un âge de référence, généralement de 50 ans pour les essences résineuses de l'est de l'Amérique du Nord (Carmean et Lenthall, 1989). Dans des conditions optimales de croissance, la hauteur des arbres dominants d'un peuplement est un bon indicateur du potentiel de croissance stationnelle d'une espèce. En effet, cette variable est fortement corrélée au volume et faiblement corrélée à la densité des peuplements (Davis et Johnson, 1987). Cependant, dans le cas des espèces résineuses et tolérantes à l'ombre que l'on retrouve dans les sapinières, l'utilisation de l'IQS pose certains problèmes. Tout d'abord, par leur capacité à se régénérer sous-couvert et à supporter la compétition pendant plusieurs années, les espèces

tolérantes subissent un retard de croissance (oppression) pouvant atteindre plusieurs décennies (Morris, 1948 ; Assman, 1970 ; Zarnovican, 1981 ; Burns et Honkala, 1990). Cette variabilité de l'âge des tiges causée par l'oppression rend difficile la schématisation de la croissance potentielle à l'aide de la relation hauteur-âge. D'autres facteurs tels que la défoliation causée par les épidémies d'insectes, comme la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBÉ) affectent également la croissance en hauteur des principales essences résineuses des sapinières (MacLean, 1985). Cette perturbation modifie de façon significative la relation hauteur-âge et rend son utilisation difficile pour définir des IQS (Monserud, 1987 ; Saucier, 1993).

D'autres méthodes telles que l'utilisation d'indices mixtes utilisant à la fois des indices écologiques et dendrométriques méritent d'être considérées (Decourt, 1973). Cet auteur indique que ce type d'indice reliant la mesure de la hauteur dominante à des variables écologiques combine les avantages des autres types indices (climatiques, floristiques, écologiques, dendrométriques) et en évite les inconvénients. La relation hauteur-âge liée à des variables de station a d'ailleurs été utilisée à maintes reprises dans des travaux portant sur la productivité forestière des sapinières dans l'Est de l'Amérique du Nord. Rappelons les travaux de Page (1976) à Terre-Neuve, Zelazny et *al.* (1989) au Nouveau-Brunswick, Linteau (1955), Lafond (1969), Zarnovican (1983), Saucier (1992, 1993), Grondin et *al.* (1993), Bélanger et *al.* (1995) et Tremblay (1996) au Québec. Bien que la plupart de ces études aient démontré l'utilité de la classification écologique pour prédire la croissance des sapinières, certains éléments restent à préciser en ce qui concerne l'utilisation de la relation hauteur-âge comme indice de productivité. Des analyses de croissance plus élaborées, afin de mieux définir la croissance potentielle des stations, sont souhaitables. (Zarnovican, 1981, 1983 ; Saucier, 1992, 1993 ; Grondin et *al.*, 1993).

Ce projet a pour objectif principal de développer une méthode permettant d'estimer et de comparer la croissance potentielle en hauteur en fonction de l'âge des stations en stratifiant les données selon la classification écologique réalisée par Grondin et *al.* (1995) pour le sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Est. Pour atteindre cet objectif, les trois étapes suivantes seront réalisées : 1) estimer la croissance potentielle du sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.), de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.) et des épinettes noire et rouge (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P., *Picea Rubens* Sarg.) ; 2) de comparer la croissance potentielle de ces essences pour les principaux types écologiques à l'aide de

tests statistiques ; et 3) s'il y a lieu, de proposer des regroupements de types écologiques ayant une croissance apparentée pour définir des stations forestières.

## 1. Matériel et méthodes

### 1.1 Localisation et description de la région étudiée

Le territoire d'étude (figure 1) s'étend d'ouest en est de Montmagny jusqu'à Matane et borde les frontières du Maine et du Nouveau-Brunswick. Selon Thibault (1985), ce territoire est compris principalement dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune, dans les régions écologiques 5a-Basses et moyennes Appalaches et 5c-Lac Matapédia. Une petite portion du territoire fait partie du domaine de l'érablière à bouleau jaune, soit la région écologique 4a-Collines de Mégantic, Lacs Etchemin et Squatec. Toutefois, l'ensemble du territoire forestier est caractérisé par la dominance du sapin baumier, tandis que le bouleau jaune occupe la seconde place. L'érablière à bouleau jaune couvre surtout les secteurs des basses altitudes ou des basses latitudes, et on la retrouve principalement aux endroits suivants : 1) le long du littoral de Rivière-du-Loup et de Rimouski ; 2) dans la région du Témiscouata (Cabano et Dégelis) ; et 3) à l'extrême ouest du territoire dans la région de Montmagny. Selon Saucier et Grondin (1996), la majeure partie du territoire d'étude fait partie du sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Est.

Au point de vue climatique, la température annuelle moyenne se situe autour de 2,5°C et les précipitations totales annuelles varient entre 900 mm et 1 100 mm (Saucier et Robitaille, 1995). La saison de croissance s'étend généralement sur 160 à 170 jours. Au plan physiographique, le relief s'accroît de la côte vers l'intérieur des terres et se compose essentiellement de coteaux et de collines. L'altitude maximale excède rarement 600 mètres. Le substratum rocheux est sédimentaire et principalement composé de shale, de grès, de calcaire et de conglomérat. Les dépôts de surface sont surtout d'origine glaciaire et le till<sup>1</sup> domine le territoire. Les tills minces et épais se retrouvent en proportion semblable et recouvrent la plupart des coteaux et des collines. Des dépôts d'altérations de la roche en place occupent également la partie nord-est du territoire.

Le paysage forestier de la région a passablement été modifié par l'homme à la suite de plus d'un siècle d'activités forestières. On trouve actuellement des traces de récoltes

---

<sup>1</sup> Le terme **till** est utilisé pour décrire le matériau des moraines de fond ou d'ablation laissées par le passage des glaciers continentaux. Il est déposé directement par la glace sans qu'il y ait eu intervention des eaux de fonte (Robitaille et Allard, 1996).

pratiquement sur l'ensemble du territoire. Les épidémies de tordeuses des bourgeons de l'épinette (TBÉ) et les feux de forêt ont également contribué, de façon significative, à la modification du couvert végétal. Les premières épidémies de tordeuses connues ont eu lieu vers 1806, 1878 et 1912 (Blais, 1961). Plus récemment, deux autres épidémies ont été recensées, la première de 1950 à 1958 (Blais, 1961 et Lachance et *al.*, 1990) et la plus récente de 1973 à 1991 (Lachance et *al.*, 1990 ; Bordeleau et *al.*, 1989, 1990, 1991 et Bordeleau, 1992). Les peuplements affectés par la TBÉ ont fait l'objet d'importantes coupes de récupération au cours des années 80. Les feux ont également perturbé d'importantes superficies de forêt au début du siècle, principalement en 1923 (Lortie, 1979), mais ces derniers sont peu documentés. Ces étendues perturbées par le feu sont aujourd'hui couvertes de tremblais ou de tremblais résineuses (Grondin et *al.*, 1995b).

## **1.2 Classification écologique**

La classification écologique utilisée provient d'une étude effectuée dans l'ensemble du sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Est (Grondin et *al.*, 1995a, 1995b). Cette étude repose sur 2 234 points d'observations écologiques réalisés selon la norme établie par le ministère des Ressources naturelles du Québec (Saucier et *al.*, 1995). L'analyse des données porte essentiellement sur les éléments suivants :

- la détermination de groupes écologiques d'espèces<sup>2</sup> ;
- le regroupement de groupes écologiques d'espèces ;
- l'établissement de liens entre les regroupements de groupes écologiques d'espèces et les espèces arborescentes dans le but de définir des végétations potentielles<sup>3</sup> ;
- l'établissement de liens entre les regroupements de groupes écologiques d'espèces, les caractéristiques de station qui leur sont associées et la végétation potentielle afin de définir des types écologiques<sup>4</sup>.

<sup>2</sup> **Le groupe écologique d'espèces indicatrices** est l'unité de classification qui sert à décrire le sous-bois. Il est formé d'un assemblage de groupes écologiques élémentaires qui renseignent sur la qualité d'un lieu donné ainsi que sur les perturbations ou l'évolution de la végétation (MRNQ, 1996).

<sup>3</sup> **La végétation potentielle** est l'unité de classification qui synthétise les caractéristiques dynamiques de la végétation d'un lieu donné (MRNQ, 1996)..

<sup>4</sup> **Le type écologique** est une unité synthèse de classification qui exprime à la fois les caractéristiques physiques du milieu et les caractéristiques écologiques de la végétation (composition, structure et dynamisme). Le type écologique décrit un lieu donné au moyen d'une combinaison du type de milieu physique et de la végétation potentielle (MRNQ, 1996).

Ces quatre étapes s'effectuent principalement en étudiant les tableaux de végétation élaborés à l'aide d'analyses de correspondance effectuées par le logiciel *Twinspan* (Hills, 1979). Ce logiciel permet la création de tableaux de végétation sur lesquels les relevés possédant le plus d'affinités floristiques sont regroupés. Cette méthodologie s'inspire des travaux de Blouin et Grandtner (1971), Gerardin (1977, 1980), Bergeron (1980) et Bélanger (1985).

La classification écologique du territoire repose sur huit groupes d'espèces indicatrices (Grondin et al., 1995b). Le tableau 1 présente les espèces indicatrices pour les groupes retenus. À chacun des groupes, sont associées des caractéristiques particulières de station (drainage, régime nutritif), de composition forestière (essence, densité, hauteur) et d'historique des perturbations. Les stations à drainage xérique et mésique sur till d'épaisseur variable et situées généralement en haut de pente sont colonisées par la végétation potentielle de l'érablière à bouleau jaune et de l'érablière à hêtre. Ces stations sont caractérisées par le groupe de l'érable de Pennsylvanie (ERP). À mi-pente, la station de la sapinière à bouleau jaune mésique, sur till épais est dominée par le groupe de l'érable à épis (ERE). Le groupe ERE est également associé à la sapinière à bouleau jaune xérique sur dépôts mince et à la sapinière à bouleau blanc sur till d'épaisseur variable située à des altitudes supérieures à 600 mètres. Ces deux dernières stations ne sont cependant pas fréquentes sur le territoire. En bas de pente, la sapinière à bouleau jaune subhydrique sur till épais est caractérisée par la présence des subhygrophytes et par un drainage latéral. Elle est associée au groupe ERE auquel s'ajoute le groupe de la ronce pubescente (RUP). Plus bas sur la pente ou encore dans les dépressions ouvertes, on trouve la sapinière à thuya sur till épais et mal drainé. Cette station est associée aux groupes ERE et RUP auxquels s'ajoute le groupe de l'aulne rugueux (AUR) qui indique un mauvais drainage et la présence de drainage latéral. Dans les dépressions ouvertes, on retrouve la cédrière à sapin sur tourbe minérotrophe très mal drainée avec présence de drainage latéral. Cette station est associée au même groupe que la sapinière à thuya mais s'y distingue par un dépôt organique. Sur les terrains plats à légèrement ondulés, les sapinières à épinette rouge mésique et hydrique sur till pierreux ou sur dépôts sablonneux dominant. Elles sont caractérisées par le groupe des éricacées (VAA). Les sapinières à épinette rouge ou à thuya situées sur les crêtes rocheuses et dépôts minces se caractérisent également par le groupe à éricacées (VAA). Dans les dépressions fermées où l'eau est stagnante, la pessière noire sur tourbe ombrotrophe est associée au groupe des sphaignes (SPS) indicateur d'un très mauvais drainage. Cette station

occupe de faibles superficies sur le territoire. Il faut noter qu'à tous ces groupes d'espèces indicatrices peuvent s'associer, sur certaines stations, les groupes d'espèces de lumière (PTA) ou d'ombre (PLS). Le groupe des espèces de lumière indique essentiellement une faible densité des strates arborescentes résineuses ou encore un couvert fermé à dominance de feuillus. En ce qui concerne le groupe des espèces d'ombre, il est fréquemment associé aux couverts résineux denses.

Les caractéristiques de station associées aux groupes écologiques et à la végétation potentielle ont permis de définir 15 types écologiques, considérés comme des unités synthèses de classification. De par leur récurrence dans le paysage, les types écologiques peuvent être présentés sous forme de toposéquence. La figure 2 présente la toposéquence observée pour le sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Est. On y trouve la description des types écologiques à l'aide de la végétation potentielle, du milieu physique (dépôt de surface et classe de drainage) et des groupes écologiques. La codification du type écologique est celle utilisée par Grondin et *al.* (1995b). La première lettre du code indique le type de couvert forestier, la deuxième lettre, l'essence arborescente dominante de la végétation potentielle, tandis que les deux chiffres qui suivent sont un numéro séquentiel attribué à la végétation potentielle. Par exemple, FE31 indique une végétation potentielle feuillue (F) avec l'érable à sucre comme essence dominante (E) et le numéro 31 permet de préciser le type écologique de l'érablière à bouleau jaune et hêtre sur dépôts généralement mince avec drainage plutôt rapide. Cette codification distingue ce type écologique du celui de l'érablière à bouleau jaune (FE32) sur des dépôts plus épais avec drainage modéré. Généralement, les deux derniers chiffres de code sont plus élevés avec l'augmentation de l'humidité des stations. Concernant le type de dépôt et les codes correspondants, une description détaillée apparaît dans Robitaille (1988) et une description sommaire des codes est présentée à l'annexe A. La classe de drainage est celle qui a été définie par Bates et *al.* (1985) et adaptée par Saucier et *al.* (1988) pour le programme de connaissance des écosystèmes forestiers au Québec. Elle varie de 0 à 6 et une brève description de chaque classe figure à l'annexe B. Le pH de l'humus a été déterminé à partir de 90 échantillons prélevés à raison de trois échantillons par placette dans les principaux types écologiques échantillonnée. Cette variable permet de qualifier le régime nutritif des types écologiques. Une description plus détaillée des types écologiques du sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'Est figure dans Grondin et *al.* (1995b).

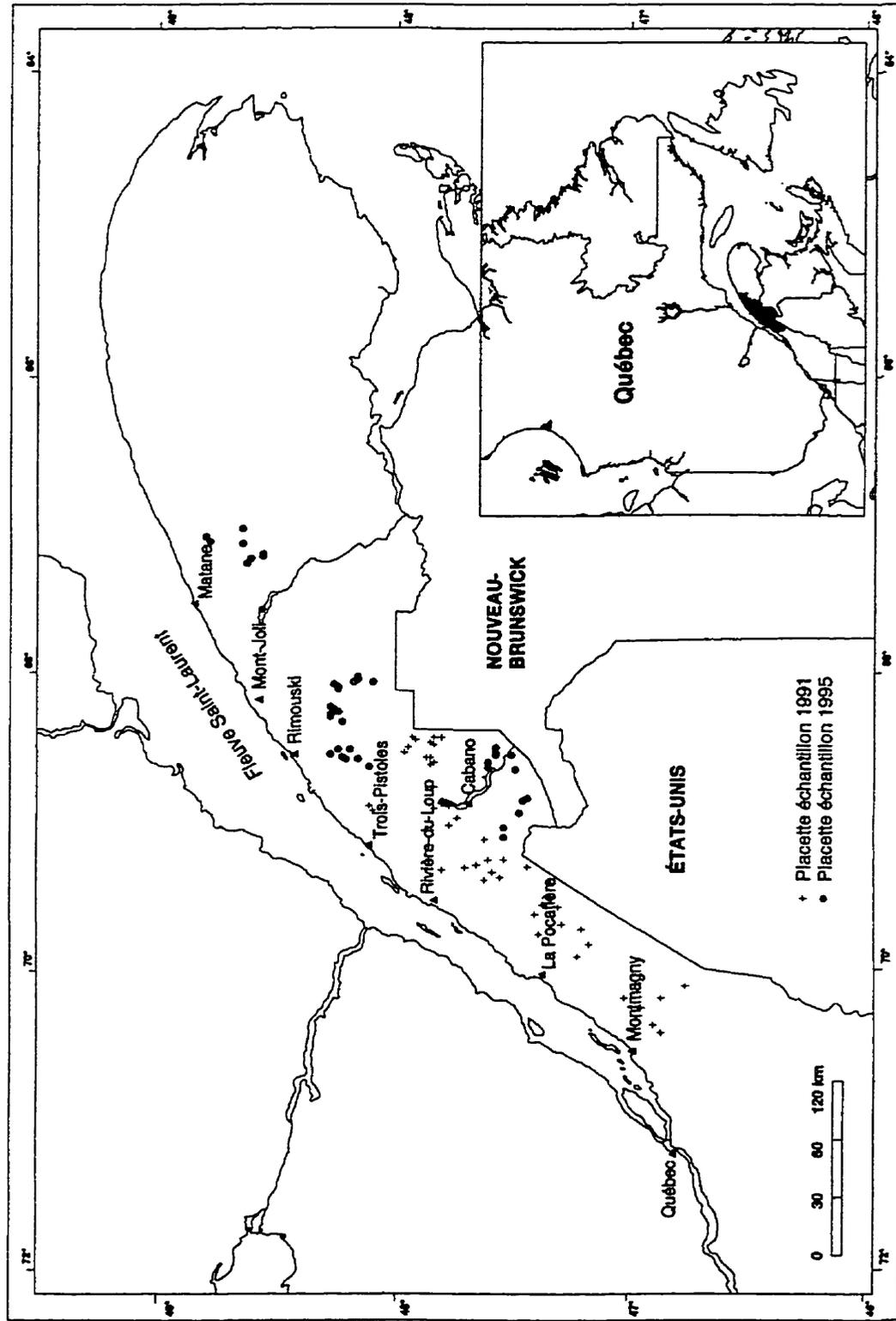
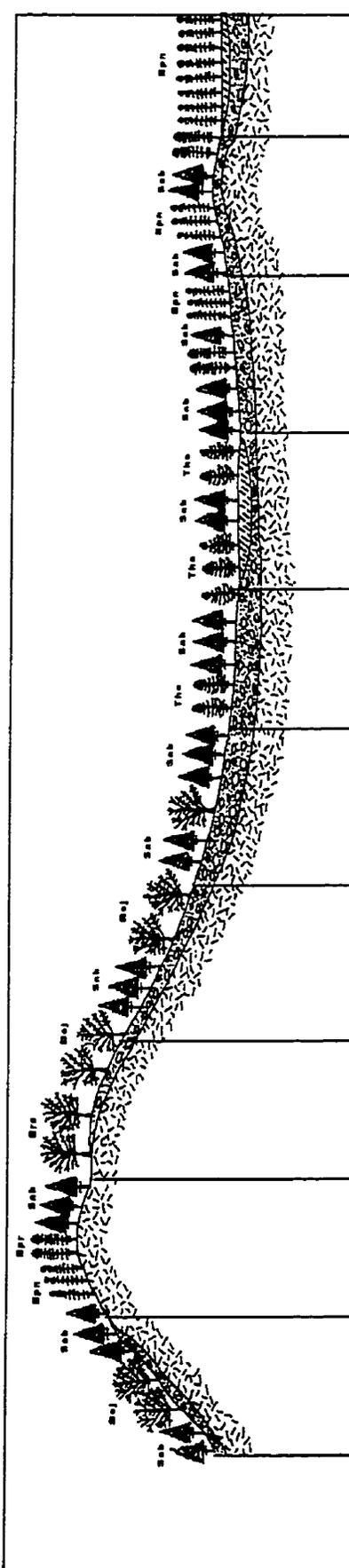


Figure 1. Localisation du territoire d'étude et des placettes-échantillons.

Tableau 1. Groupes écologiques d'espèces (Grondin et al., 1995b)

Nom du groupe <sup>a</sup>	Groupe ERP	Groupe ERE	Groupe RUP	Groupe AUR	Groupe VAA	Groupe PLS	Groupe SPS	Groupe PTA
<b>Description</b>	Les espèces des érablières	Les espèces mésiques des sapinières à bouleau jaune	Les espèces subhydriques	Les espèces hydriques des sapinières à thuya et des cédrières	Les espèces des sapinières à épinettes rouge	Les sciaphytes (espèces d'ombre)	Les espèces hydriques des pessières noires	Les héliophytes (espèces de lumière)
<b>Espèces composant le groupe écologique</b>	<i>Acer pensylvanicum</i> <i>Acer saccharum</i> <i>Fagus grandifolia</i> <i>Trillium erectum</i>	<i>Acer spicatum</i> <i>Dryopteris spinulosa</i> <i>Oxalis montana</i> <i>Rubus idaeus</i> <i>Picea glauca</i> <i>Betula lutea</i> <i>Lonicera canadensis</i>	<i>Rubus pubescens</i> <i>Thuya occidentalis</i> <i>Dryopteris disjuncta</i> <i>Athyrium filix-femina</i> <i>Galium spp.</i> <i>Fraxinus nigra</i> <i>Populus balsamifera</i> <i>Ribes lacustre</i> <i>Osmunda spp.</i>	<i>Alnus rugosa</i> <i>Mnium spp.</i> <i>Mitella nuda</i> <i>Cornus stolonifera</i> <i>Rhytidiadelphus triquetrus</i> <i>Equisetum spp.</i> <i>Thalictrum spp.</i> <i>Circaea alpina</i> <i>Petasites palmatus</i>	<i>Vaccinium spp.</i> <i>Kalmia angustifolia</i> <i>Picea mariana</i> <i>Ledum groenlandicum</i> <i>Chamaedaphne calyculata</i> <i>Viburnum cassinoides</i> <i>Cladina spp.</i> <i>Alnus crispa</i> <i>Epigaea repens</i> <i>Chimaphila umbellata</i>	<i>Pleurozium schreberi</i> <i>Hylocomium splendens</i> <i>Dicranum spp.</i>	<i>Sphagnum spp.</i>	<i>Pteridium aquilinum</i> <i>Aster macrophyllus</i> <i>Diervilla lonicera</i> <i>Pleurozium schreberi</i>

<sup>a</sup> Les groupes écologiques d'espèces sont nommés à partir de l'espèce la plus abondante du groupe. Ils sont identifiés à partir du code de l'espèce défini par Saucier et al. (1994). ERP : *Acer pensylvanicum* ; ERE : *Acer spicatum* ; RUP : *Rubus pubescens* ; AUR : *Alnus rugosa* ; VAA : *Vaccinium spp.* ; PLS : *Pleurozium schreberi* ; SPS : *Sphagnum spp.* ; PTA : *Pteridium aquilinum*



Codification du type écologique <sup>a</sup>	MS14 (RS12)	RS44 (RS11)	FE32 (FE31)	MS12 (MS22)	MS13	RS22	RC22	RS43	RS42	RE32
Nom du type écologique (végétation potentielle)	Sapinière à bouleau jaune xérique	Sapinière à épinette rouge (thuya) xérique	Érablière à bouleau jaune mésique	Sapinière à bouleau jaune mésique	Sapinière à bouleau jaune subhydrique	Sapinière à thuya hydrique	Cédrière à sapin sur tourbe minérotrophe	Sapinière à épinette rouge hydrique	Sapinière à épinette rouge mésique	Pessière noire sur tourbe ombrotrophe
Dépôt (code) <sup>b</sup>	Minéral mince ou roc (M1A, RIA, R)	Minéral mince ou roc (M1A, RIA, R)	Minéral épais (1A, 1AY)	Minéral épais (1A, 1AY, 1AM)	Minéral épais (1A, 1AY)	Minéral épais (1A, 1AY)	Organique (7T, 7E)	Minéral épais (1A, 1AD, 2BE, 3AN)	Minéral épais (1A, 1AD, 2BE, 3AN)	Organique (7T, 7E)
Drainage (classe) <sup>c</sup>	Xérique (10,20)	Xérique (10)	Mésique (20,30)	Mésique (20,30)	Hydrique (31,41)	Hydrique (41,51)	Hydrique (61)	Hydrique (40,50)	Mésique (20,30)	Hydrique (60)
pH (eau) <sup>d</sup>	-	3,4-4,7	3,7-4,6	3,6-5,3	3,7-6,8	5,2-6,5	5,6-7,3	3,2-3,7	3,4-3,6	-
Principales Essences <sup>e</sup>	SAB-BOJ-ERR	SAB-THO-EPB	ERS-ERR-BOJ	SAB-BOJ-EPB	SAB-BOJ-FRN	SAB-THO	THO-SAB	SAB-EPX	SAB-EPX	EPN-SAB
Groupe écologique <sup>f</sup>	ERE	PLS-VAA	ERP	ERE	ERE-RUP	ERE-RUP-	ERE-RUP-AUR	PLS-VAA-SPS	PLS-VAA	VAA-SPS

<sup>a</sup> ( ) indique un type écologique rare possédant une répartition géographique particulière, <sup>b</sup> selon Robitaille (1988), <sup>c</sup> selon Saucier et al. (1994), <sup>d</sup> pH moyen de l'humus, <sup>e</sup> BOJ : bouleau jaune, EPB : épinette blanche, EPX : épinette rouge, ERR : érable rouge, ERS : érable à sucre, FRN : frêne noir, SAB : sapin baumier, THO : thuya occidental, voir tableau 1 pour description des groupes écologiques, ( - ) : indique des données non disponibles.

Figure 2. Toposéquence et principales caractéristiques des types écologiques.

### **1.3 Protocole dendrométrique**

Au total, 88 placettes circulaires de 11,28 m de rayon (1/25 ha) ont été établies en 1991 et en 1995 dans des peuplements représentatifs des principaux types écologiques du territoire d'étude. Les peuplements étaient considérés comme représentatifs lorsqu'ils occupaient une partie homogène en regard du milieu physique (type de dépôt et classe de drainage) et qu'ils reflétaient bien la végétation potentielle de chacun des types écologiques étudiés. Les peuplements choisis devaient être âgés d'au moins 50 ans, avoir une densité du couvert supérieure à 40%, une hauteur supérieure à 7 m et ne pas présenter de défoliation importante.

Dans chaque placette, toutes les tiges vivantes ayant un diamètre de 9 cm et plus à 1,30 m du niveau le plus haut du sol ont été identifiées et dénombrées par classe de 2 cm. Le type de peuplement, les classes de densité, de hauteur et d'âge, les perturbations, l'exposition et le pourcentage de pente ont été notés. Les variables physiques du milieu (type de dépôt et son épaisseur, classe de drainage) et le type écologique ont été relevés. Trois échantillons d'humus ont également été prélevés dans 30 placettes établies en 1995 pour analyse du pH. Le tableau 2 présente les caractéristiques dendrométriques des placettes-échantillons et les résultats concernant le pH de l'humus sont présentés à la figure 2.

De 3 à 5 arbres par essence, exempts de défauts apparents sur le tronc et la cime, ont été choisis dans chaque placette ou à proximité de celle-ci pour l'analyse de tige. Les arbres choisis devaient avoir leur diamètre à 1,30 m (DHP) le plus près du 95 percentile de la courbe cumulative du nombre de tiges de la placette. De cette façon, l'indice de station correspond à la hauteur moyenne des 10 % des plus gros arbres de la placette (Zarnovican, 1983).

Les arbres sélectionnés ont été abattus et la longueur totale de chaque arbre ainsi que la longueur et la largeur de la cime verte ont été mesurées. Le prélèvement des disques sur les tiges abattues a systématiquement été réalisé à 0,15 m, 0,40 m, 1,00 m et 1,30 m de hauteur et par la suite à tous les mètres jusqu'à l'extrémité de la tige. Pour les tiges récoltées en 1995, la section située à 0,40 m a été remplacée par deux sections situées à 0,30 m et à 0,60 m. De plus, deux disques supplémentaires ont été prélevés pour les tiges de sapin baumier et d'épinette blanche, dans la zone susceptible d'être affectée par la défoliation,

causée par la TBÉ. Ces disques étaient tronçonnés à la demie des deux sections de 1 m suivant les dix dernières années de croissance mesurées à l'aide des verticilles depuis la flèche terminale de la tige

Les disques prélevés ont été séchés puis poncés afin d'augmenter le contraste entre le bois initial et le bois final (cernes annuels). La lecture des cernes a été réalisée sur quatre rayons perpendiculaires pour les disques récoltés aux sections inférieures ou égales à 1,30 m ainsi que pour les disques de forme elliptique des sections supérieures. Les autres disques ont été mesurés sur deux rayons opposés. La lecture des cernes a été effectuée à l'aide d'un compas électronique développé par Zarnovican et *al.* pour les disques récoltés en 1991 et à l'aide du système automatique de mesure Windendro® pour les tiges récoltées en 1995. La croissance en hauteur a également été corrigée selon la procédure de Carmean (1972) qui, d'après Dyer et Baily (1987), est celle qui donne les meilleurs résultats. Cette correction est nécessaire puisque la section prélevée sur la tige se trouve habituellement à un point intermédiaire de la croissance annuelle et non à la fin de cette période. Elle est basée sur la théorie qu'en moyenne, la section prélevée se trouve au centre d'un accroissement annuel en hauteur. La mesure des accroissements a permis de reconstituer le développement en hauteur de 574 tiges à l'aide du programme de Zarnovican et *al.* (1992) pour les données de 1991 et du programme Anatige (Bégin, 1996) pour les données de 1995 (tableau 3).

#### **1.4 Traitement des données**

Dans un premier temps, des graphiques présentant l'accroissement en hauteur observé sur les tiges récoltées ont été tracés pour chaque arbre. La technique de l'analyse de tiges utilisée permet de reconstituer la croissance apicale des arbres et par le fait même le développement temporel des tiges. Les graphiques obtenus ont montré que si certaines tiges ont eu un développement normal, d'autres ont subi des retards de croissance. Ces retards ont pour effet d'augmenter l'âge biologique de l'arbre par rapport à son stade de développement (Zarnovican, 1983). Ces périodes de faible croissance sont généralement attribuables à la compétition pour la lumière que subissent les espèces tolérantes à l'ombre lorsqu'elles ne forment pas le couvert dominant (Burns et Honkala, 1990). D'autres facteurs externes tels que les épidémies de TBÉ peuvent également venir réduire significativement la croissance des essences étudiées (MacLean, 1985 ; Gagnon, 1985). La figure 3, qui présente les accroissements moyens annuels des tiges récoltées en 1995, permet de constater les variations de la croissance des essences étudiées sur une période de 100 ans.

Tableau 2. Caractéristiques dendrométriques marchandes des placettes-échantillons

Type écologique (code)	n <sup>a</sup>	Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type
Érablière à bouleau jaune et hêtre (FE31)	1	Nombre de tiges (n/ha)	-	-	600	-
	1	Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	-	-	29,6	-
	1	Volume (m <sup>3</sup> /ha) <sup>b</sup>	-	-	197,1	-
Érablière à bouleau jaune (FE32)	8	Nombre de tiges (n/ha)	475	1400	853	273,4
	8	Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	23,8	43,9	30,7	5,9
	8	Volume (m <sup>3</sup> /ha) <sup>b</sup>	149,4	280,1	194,5	39,3
Sapinière à bouleau jaune mésique (MS12)	18	Nombre de tiges (n/ha)	475	1725	1111	388,6
	18	Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	23,8	46,5	34,0	6,5
	18	Volume (m <sup>3</sup> /ha) <sup>b</sup>	149,2	277,7	206,3	38
Sapinière à bouleau jaune subhydrique (MS13)	15	Nombre de tiges (n/ha)	700	2050	1296	403,6
	15	Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	31,0	49,3	39,5	5,5
	15	Volume (m <sup>3</sup> /ha) <sup>b</sup>	177,2	300,2	232,8	37,2
Cédrière à sapin (RC22)	11	Nombre de tiges (n/ha)	1175	1775	1391	205
	11	Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	27,3	64,9	44,4	11,8
	11	Volume (m <sup>3</sup> /ha) <sup>b</sup>	129,9	320,1	216,9	71,6
Sapinière à thuya xérique (RS11)	5	Nombre de tiges (n/ha)	675	1550	1110	325,3
	5	Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	25,9	41,4	34,6	7,2
	5	Volume (m <sup>3</sup> /ha) <sup>b</sup>	153,7	237,1	202,2	36,5
Sapinière à thuya hydrique (RS22)	8	Nombre de tiges (n/ha)	775	1700	1203	329,3
	8	Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	19,9	51,8	37,1	9,7
	8	Volume (m <sup>3</sup> /ha) <sup>b</sup>	102,5	275,6	190,0	51,7
Sapinière à épinette rouge ou noire mésique (RS42)	12	Nombre de tiges (n/ha)	450	1775	1223	385,0
	12	Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	23,8	37,9	30,2	5,0
	12	Volume (m <sup>3</sup> /ha) <sup>b</sup>	141,4	225,9	179,0	28,8
Sapinière à épinette rouge ou noire hydrique (RS43)	10	Nombre de tiges (n/ha)	900	2550	1430	495,8
	10	Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	24,6	42,7	33,5	5,5
	10	Volume (m <sup>3</sup> /ha) <sup>b</sup>	127,2	235,2	192,1	31,3
Total	88	Nombre de tiges (n/ha)	450	2550	1209	392,4
	88	Surface terrière (m <sup>2</sup> /ha)	19,9	64,9	35,6	8,3
	88	Volume (m <sup>3</sup> /ha) <sup>b</sup>	102,5	320,1	203,9	44,7

<sup>a</sup> nombre de placettes-échantillons, <sup>b</sup> volume marchand brut.

Tableau 3. Nombre de tiges par essence et par type écologique

Essence	Type écologique									Total
	FE31	FE32	MS12	MS13	RC22	RS11	RS22	RS42	RS43	
Sapin baumier	9	23	77	53	10	25	25	18	24	264
Épinette blanche	-	7	28	34	9	8	19	7	5	117
Épinettes noire et rouge	-	-	5	-	41	11	9	38	27	131
Thuya occidental	-	-	-	13	24	3	22	-	-	62
Total	9	30	110	100	84	47	75	63	56	574

<sup>a</sup> FE31 : érablière à bouleau jaune et hêtre ; FE32 : érablière à bouleau jaune ; MS12 : sapinière à bouleau jaune mésique ; MS13 : sapinière à bouleau jaune subhydrique ; RC22 cédrière à sapin ; RS11 sapinière à thuya xérique ; RS22 : sapinière à thuya hydrique ; RS42 sapinière à épinette rouge mésique ; RS43 : sapinière à épinette rouge hydrique.

On remarque tout d'abord une période de faible accroissement pouvant s'échelonner sur plusieurs années. Cette période est probablement attribuable à la compétition exercée par les strates supérieures. Par la suite, une augmentation graduelle et soutenue de la croissance en hauteur serait associée à la libération des tiges. La diminution importante et synchrone pour le sapin et les épinettes vers 1975 correspond au plus fort de l'épidémie de TBÉ dans cette région (Blais, 1983 ; Lachance et *al.*, 1990). Finalement, on observe une reprise graduelle de la croissance pour ces espèces hôtes de la TBÉ et un retour à la normale au milieu des années 80. Les données recueillies sur 62 thuyas (*Thuja occidentalis* L.) dans le même territoire permettent de vérifier que la baisse de croissance ne s'est pas produite pour cette période chez cette espèce non-hôte de la TBÉ. Ces observations permettent de vérifier l'hypothèse qu'il existe des diminutions importantes de croissance en hauteur attribuables à la compétition et aux épidémies de TBÉ. Ces pertes doivent être considérées lors de la modélisation puisqu'elles modifient significativement le patron de croissance en hauteur des tiges. Selon Carmean (1975), il est nécessaire d'écarter de l'analyse les périodes pendant lesquelles la croissance est conditionnée par des facteurs autres que ceux liés à la qualité stationnelle. Conséquemment, il est souhaitable d'évaluer la croissance que ces arbres auraient eu en l'absence des facteurs externes.

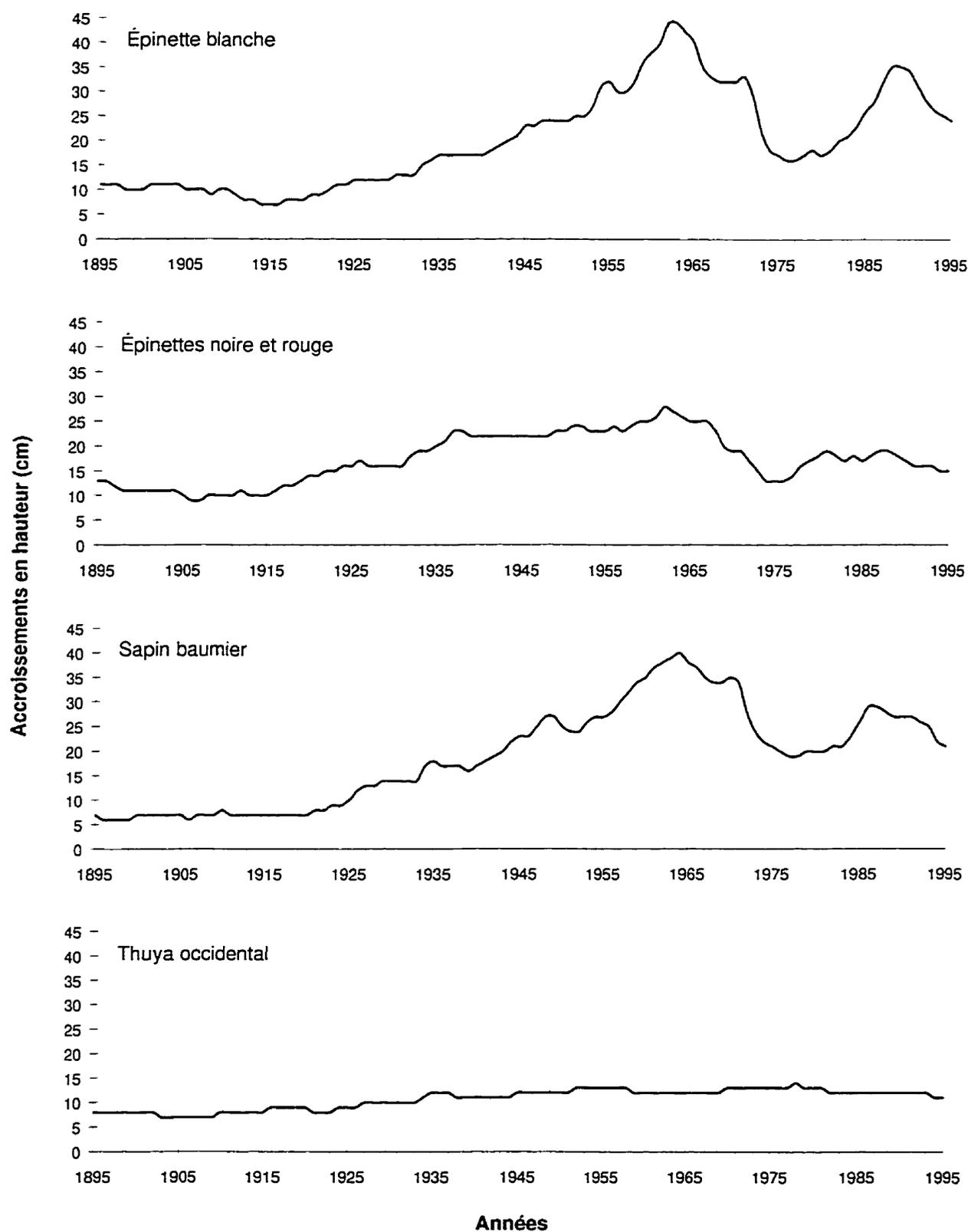


Figure 3. Accroissements moyens annuels en hauteur des espèces pour la période 1895 à 1995.

## 1.4.1 Correction de l'âge des tiges

### 1.4.1.1 Périodes d'oppression

Afin d'exclure la période d'oppression, l'âge à 1,30 m de hauteur a été utilisé plutôt que l'âge à la souche comme le suggèrent plusieurs auteurs (Curtis, 1964 ; Boudoux, 1978 ; Griffin et Johnson, 1980 ; Vicary et *al.*, 1984 ; Smith et Carmean, 1987 ; Carmean et Lenthall, 1989 ; Ker et Bowling, 1991). Bien que plusieurs tiges ne montraient plus d'oppression suite à cette correction, l'observation des graphiques reliant la hauteur et l'âge à 1,30 mètres, démontrait que 173 en présentaient toujours. Ces observations correspondent aux résultats de Zarnovican (1981) qui indiquent que la période d'oppression peut affecter les tiges au-delà de 1,30 m. Pour ces tiges, une évaluation de la fin de la période d'oppression a dû être réalisée à l'aide de graphiques illustrant les accroissements annuels en hauteur de chacune des tiges. Il a ainsi été possible d'évaluer la hauteur à la fin de la période d'oppression puisqu'une démarcation assez nette de l'accroissement en hauteur apparaît entre cette période et la période de libération des tiges. Le tableau 4 montre les statistiques descriptives concernant la hauteur à la fin de la période d'oppression pour les 173 tiges présentant de l'oppression après 1,30 m de hauteur.

La connaissance de la hauteur à la fin de la période d'oppression a permis de corriger l'âge des tiges opprimées. Cette correction a été réalisée par comparaison avec le temps moyen qu'ont mis les arbres non opprimés pour atteindre cette même hauteur (temps de passage). Cette correction, réalisée par essence et par type écologique permet de s'assurer que les tiges ont crû dans des conditions similaires. La correction de l'âge des tiges a également été vérifiée à partir des graphiques exprimant la relation hauteur-âge des arbres corrigés par comparaison avec les graphiques exprimant la même relation, pour les tiges n'ayant pas subi d'oppression. Cette vérification a permis de s'assurer que la correction de l'âge des tiges opprimées n'entraîne pas une surestimation de la croissance. Dans certains cas, il n'a pas été possible d'effectuer une correction appropriée. Il semble que ces tiges aient subi une compétition sur une période très prolongée. Ce type de données n'étant pas souhaitable pour établir le potentiel de croissance des stations, elles ont donc été retirées.

Tableau 4. Statistiques descriptives de la hauteur à la fin de la période d'oppression

Essence	n <sup>a</sup>	Hauteur (m)			
		Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type
Épinette blanche	38	2,10	7,38	3,26	1,21
Épinettes noire et rouge	51	2,13	6,05	2,82	0,86
Saoin baumier	84	2,10	5,37	2,88	0,78
Toutes	173	2,10	7,38	2,94	0,93

<sup>a</sup> nombre total de tiges.

L'observation des graphiques présentant la relation hauteur-âge des tiges opprimées a également permis de vérifier qu'à la suite de la période d'oppression la croissance de la majorité des tiges s'effectue au même rythme que celles n'ayant pas subi d'oppression. La figure 4 permet d'illustrer ces observations à partir de la relation hauteur-âge de six tiges de sapin baumier récoltées dans la même placette. Ces observations correspondent aux résultats obtenus par Morris (1948), Zarnovican (1983), Gagnon (1985) et Riopel (1998). L'effet de la correction est également illustré sur cette figure et permet de vérifier la validité de la méthode de correction de l'âge.

#### 1.4.1.2 Épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette

Comme il a été démontré précédemment, la dernière épidémie de la TBÉ a grandement affecté la croissance apicale des essences étudiées (figure 3). L'observation des graphiques présentant la croissance annuelle en hauteur pour chacune des tiges a permis de constater que la majorité d'entre elles avaient été affectées par une réduction de croissance durant les périodes épidémiques documentées dans la littérature (Blais, 1961 ; Blais et Martineau, 1963; Blais, 1984 ; Lachance et *al.*, 1990 ; Bordeleau et *al.*, 1989, 1990, 1991 et Bordeleau, 1992). Une évaluation de la durée de la réduction de croissance a été effectuée à partir de ces graphiques pour ainsi pouvoir estimer la croissance potentielle qu'aurait dû avoir chaque tige pendant la période épidémique. Pour être retenue comme période de réduction de croissance attribuable à la tordeuse des bourgeons de l'épinette, la période concernée devait avoir des accroissements annuels inférieurs à trois écarts types de la moyenne des accroissements de la tige. De plus, cette période devait se prolonger sur au moins cinq années consécutives et être située dans les années d'épidémies connues. Cette procédure a permis d'identifier les périodes présentant une baisse marquée de croissance en hauteur

depuis le début de l'épidémie jusqu'à ce que la croissance corresponde à l'accroissement moyen prévalant avant la défoliation.

La correction des courbes hauteur-âge des tiges affectées par une réduction de croissance causée par les épidémies de la TBÉ a été réalisée en utilisant un modèle mathématique. L'équation de base (équation 1) est celle de Chapman-Richards (Richards, 1959) à laquelle on a ajouté des variables binaires (équation 2) selon la méthode de Riopel (1998). Les variables binaires introduites dans l'équation permettent d'enlever les données de croissance correspondantes à la période épidémique et d'ajuster la courbe suivant cette période, après avoir défini une variable  $Z_{1i}$  valant 1 si l'observation  $i$  survient après la période épidémique et 0 sinon.

$$[1] \text{ Hauteur}_i = 1,3 + b_1[1 - \exp(-b_2 \times \text{âge})]^{b_3}$$

$$[2] \text{ Hauteur}_i = 1,3 + b_1[1 - \exp(-b_2 \times (\text{âge}_i + c_1 \times Z_{1i}))]^{b_3}.$$

où  $b_1$ ,  $b_2$  et  $b_3$  sont les coefficients de régression et exp est l'exponentiel de la base du logarithme népérien. Enfin, on utilise la valeur estimée de  $c_1$ , qui représente l'effet de retard sur l'âge de la tige que produit la période d'épidémie, afin d'ajuster l'âge après cette période. Si plus d'une période est observée sur une même tige, on ajoute d'autres variables binaires  $Z$ , et le modèle est augmenté en conséquence. Le résultat de cette correction illustré à la figure 5 permet de constater l'ajustement de la courbe hauteur-âge sur une tige de sapin baumier. Comme dans le cas de la correction de la période d'oppression, chaque tige ajustée par cette procédure a été comparée aux tiges de la même espèce n'ayant pas subi de défoliation et ayant crû sur le même type écologique. Cette vérification permettait de s'assurer d'un ajustement adéquat qui n'entraîne pas de surestimation de la croissance.

La correction réalisée sur l'âge pour l'oppression et la réduction de croissance due à la défoliation par la TBÉ a permis de retenir 485 tiges pour la modélisation de la croissance en hauteur du sapin baumier, de l'épinette blanche et des épinettes noire et rouge. Le tableau 5 présente les statistiques descriptives des tiges retenues.

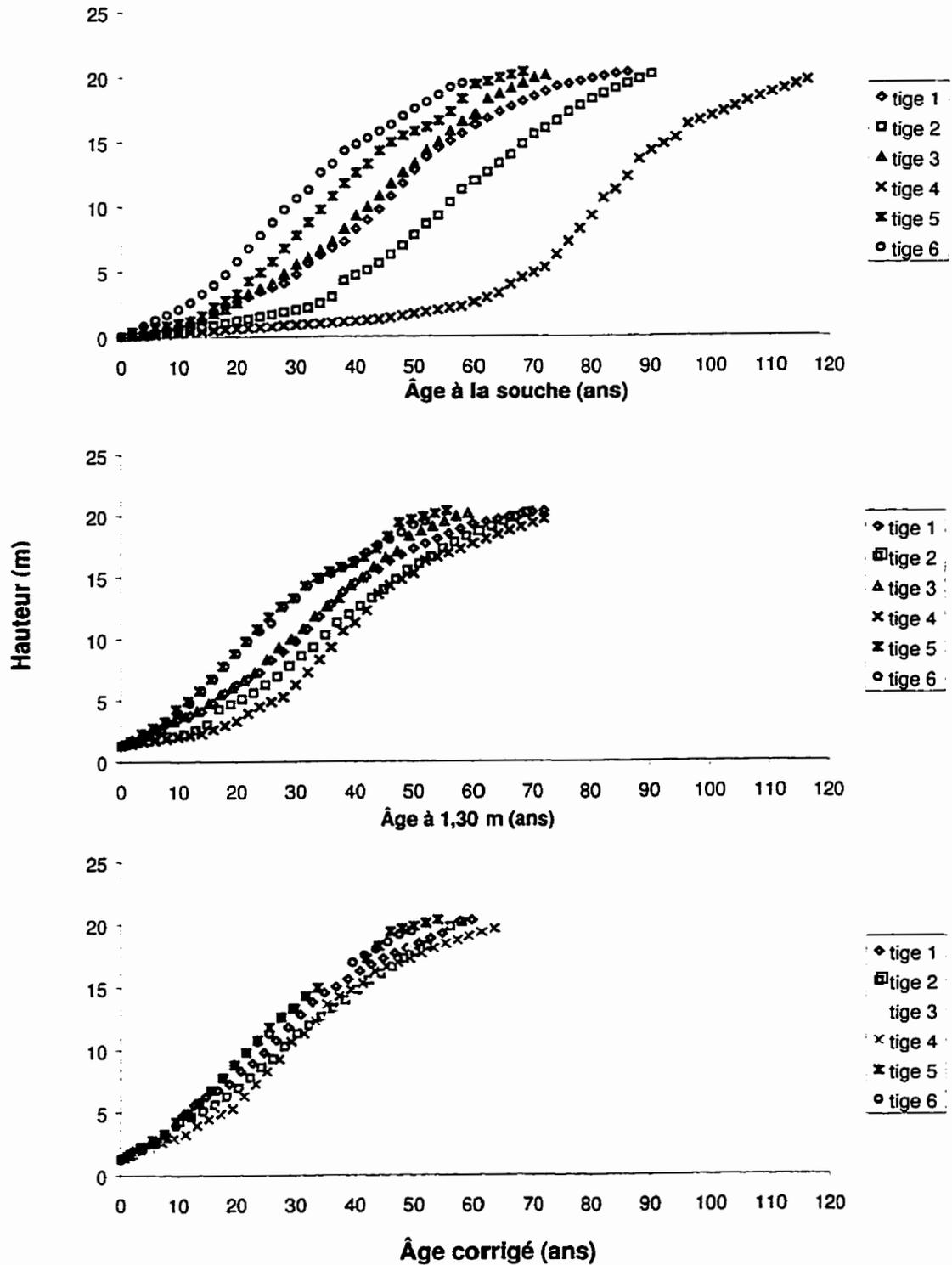


Figure 4. Exemple de correction des courbes hauteur-âge de six sapins baumiers d'une même placette.

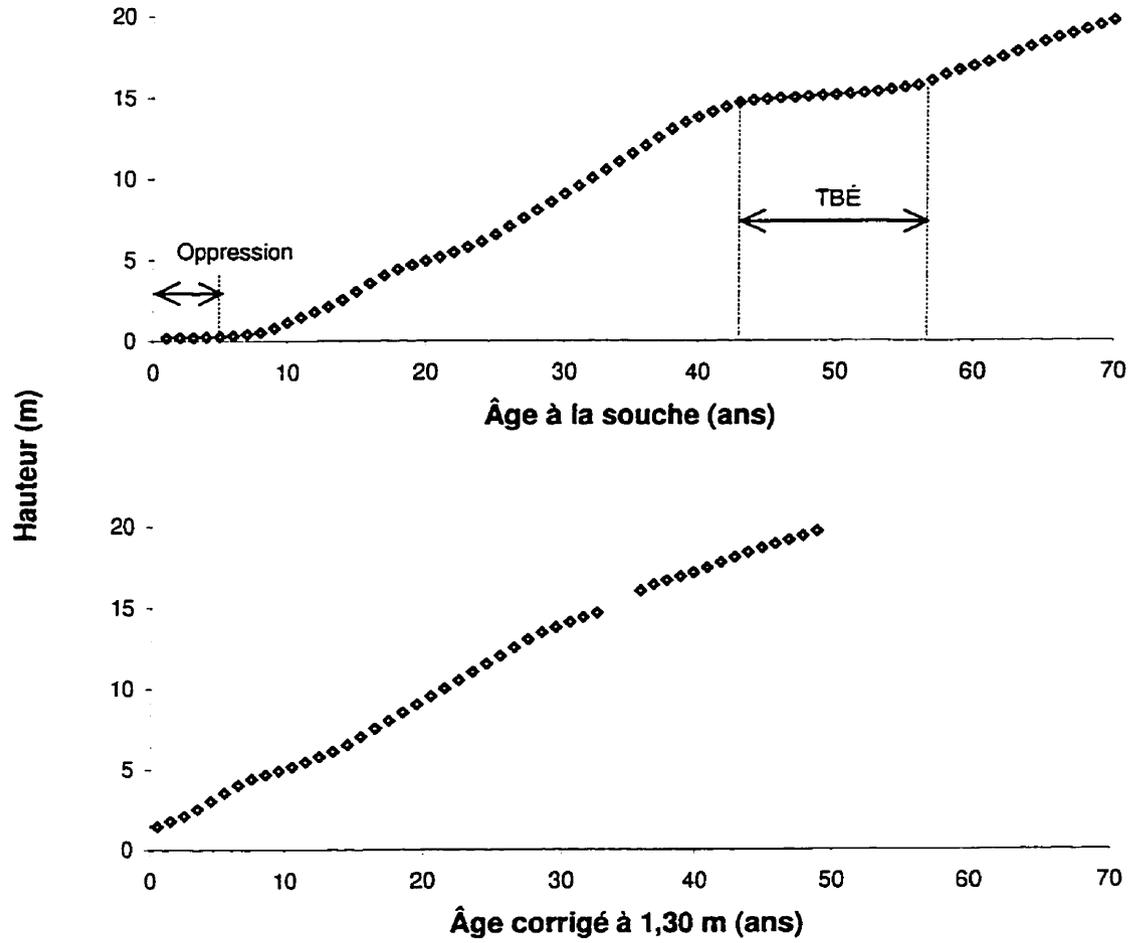


Figure 5. Exemple d'ajustement de la courbe hauteur-âge pour enlever la période d'oppression et la période associée une épidémie de TBÉ.

Tableau 5. Statistiques descriptives des tiges utilisées pour la modélisation

Variable	n <sup>a</sup>	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type
Épinette blanche					
DHP (mm)	103	171,0	439,4	250,6	43,3
Hauteur totale (m)	103	12,3	24,1	18,1	2,1
Âge à la souche (ans)	103	36,0	178,0	82,1	29,4
Âge à 1,30 m (ans)	103	26,5	144,5	64,6	23,9
Âge corrigé (ans)	103	26,5	123,1	51,6	14,5
Épinettes noire et rouge					
DHP (mm)	129	153,4	358,1	234,1	38,5
Hauteur totale (m)	129	12,3	22,4	17,5	2,2
Âge à la souche (ans)	129	51,0	200,0	104,7	39,0
Âge à 1,30 m (ans)	129	42,5	185,0	86,1	33,9
Âge corrigé (ans)	129	35,0	164,5	70,5	26,6
Sapin baumier					
DHP (mm)	253	152,7	354,9	232,6	39,1
Hauteur totale (m)	253	11,4	23,8	17,4	2,3
Âge à la souche (ans)	253	42,0	195,0	77,4	22,0
Âge à 1,30 m (ans)	253	31,8	193,2	61,8	19,6
Âge corrigé (ans)	253	31,3	114,1	51,3	12,6
Toutes					
DHP (mm)	485	152,7	439,4	236,8	40,4
Hauteur totale (m)	485	11,4	24,1	17,6	2,2
Âge à la souche (ans)	485	36,0	200,0	85,6	31,2
Âge à 1,30 m (ans)	485	26,5	193,2	68,9	27,1
Âge corrigé (ans)	485	26,5	164,5	56,4	19,6

<sup>a</sup> âge à 1,30 m de hauteur, <sup>b</sup> âge corrigé.

### 1.4.3 Description du modèle

Un modèle tenant compte de la corrélation inhérente aux mesures répétées et permettant de comparer entre elles les courbes hauteur-âge des arbres d'une même espèce, en fonction des types écologiques, a été utilisé. Ce modèle tient compte du déséquilibre causé par le nombre inégal de mesures, puisque le nombre de disques prélevés varie en fonction de la hauteur de chaque arbre. L'approche consiste en un modèle non linéaire à coefficients aléatoires applicable à des données de croissance. Le modèle permet l'incorporation d'une structure de corrélation provenant d'un processus autorégressif de premier ordre supposé chez les erreurs pour les observations provenant d'un même individu. Il s'inspire des travaux

de Lindstrom et Bates (1990). Le modèle général de régression non linéaire mixte est le suivant :

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{f}(\boldsymbol{\phi}_i, \mathbf{X}_i) + \mathbf{e}_i,$$

$$\boldsymbol{\phi}_i = \mathbf{A}_i \boldsymbol{\beta} + \mathbf{B}_i \mathbf{b}_i, \quad \mathbf{b}_i \rightarrow N(\mathbf{0}, \mathbf{D}), \quad \mathbf{e}_i \rightarrow N(\mathbf{0}, \sigma^2 \Lambda_i),$$

où  $\mathbf{y}_i$  est un vecteur de  $n_i$  mesures répétées recueillies auprès de l'individu  $i$  ;  $\mathbf{X}_i$  est une matrice de variables explicatives ;  $\boldsymbol{\phi}_i$  est un vecteur de  $r$  paramètres ;  $\boldsymbol{\beta}$  est un vecteur de  $p$  paramètres de population fixes ;  $\mathbf{b}_i$  est un vecteur de  $q$  effets aléatoires ;  $\mathbf{A}_i$  et  $\mathbf{B}_i$  sont des matrices d'incidence de dimensions  $r \times p$  et  $r \times q$  respectivement ; et enfin  $\mathbf{e}_i$  est un vecteur d'erreurs aléatoires. Ajoutons que les  $\mathbf{e}_i$  sont supposés indépendants et d'une distribution normale avec matrice de variances covariances  $\sigma^2 \Lambda_i$ , que les  $\mathbf{b}_i$  sont aussi considérés indépendants et identiquement distribués avec moyenne  $\mathbf{0}$  et matrice de variances covariances  $\mathbf{D}$ , et qu'en plus les  $\mathbf{b}_i$  et les  $\mathbf{e}_i$  sont présumés mutuellement indépendants. La forme qu'arbore  $\Lambda_i$  lorsque l'on pose l'hypothèse d'une structure autorégressive d'ordre 1 pour les erreurs et que le temps entre deux mesures successives est constant est :

$$\Lambda_i = \begin{pmatrix} 1 & \rho & \rho^2 & \cdot & \cdot & \cdot & \rho^{n_i-1} \\ \rho & 1 & \rho & \rho^2 & & & \cdot \\ \rho^2 & \rho & 1 & \rho & \rho^2 & & \cdot \\ \cdot & \rho^2 & \rho & 1 & \rho & \rho^2 & \cdot \\ \cdot & & \rho^2 & \rho & 1 & \rho & \rho^2 \\ \cdot & & & \rho^2 & \rho & 1 & \rho \\ \rho^{n_i-1} & \cdot & \cdot & \cdot & \rho^2 & \rho & 1 \end{pmatrix}$$

Définissons enfin le vecteur  $\boldsymbol{\theta}$  qui est composé des paramètres uniques de  $\mathbf{D}$  ainsi que de  $\rho$  et. La fonction utilisée comme il a été mentionné précédemment est celle de Chapman-Richards avec trois paramètres (équation 1). Ce modèle a été retenu puisqu'il avait permis de modéliser adéquatement les données d'analyses de tiges recueillies en 1991 (Lapointe, 1995). Ce modèle non linéaire permet de produire des courbes polymorphes. Il est également reconnu pour un ajustement précis aux données de croissance des arbres et des peuplements forestiers (Zeide, 1993). Afin de réaliser cette modélisation, la macro NLINMIX de SAS a été employée (Littel et al., 1996). Les tests pour la comparaison des courbes par essence et par type écologique sont du type de Wald, tel que suggéré par Vonesh et Carter

(1992). Ces tests sont basés sur la distribution asymptotique des paramètres et ne sont valides que pour de grands échantillons. La forme générale de l'hypothèse dont chacune des comparaisons constitue un cas particulier est la suivante :  $H_0: I(\beta) = \mathbf{0}$  contre  $H_1: I(\beta) \neq \mathbf{0}$ . Le test de cette dernière, dénotant par  $L$  le Jacobien de  $I$ ,  $L = \partial I(\beta) / \partial \beta$ , peut se faire en utilisant la statistique suivante :

$$W(\hat{\theta}) = I'(\hat{\beta}(\hat{\theta})) [L(\hat{\beta}(\hat{\theta})) \hat{\Omega}(\hat{\theta}) L'(\hat{\beta}(\hat{\theta}))]^{-1} I(\hat{\beta}(\hat{\theta}))$$

où  $\hat{\Omega}(\hat{\theta})$  est l'estimé de la matrice de variance covariance de  $\hat{\beta}(\hat{\theta})$ ,  $\nu$  est le nombre de restrictions sous l'hypothèse nulle. Cette statistique est distribuée de façon asymptotique, sous  $H_0$ , selon une loi du khi-deux avec  $\nu$  degrés de liberté.

Pour conserver un seuil global au plus égal à  $\alpha$  (0,05), les tests pour chacune des comparaisons ont été effectués à un seuil local de  $\alpha/m$ ,  $m$  étant le nombre de comparaisons faites. Il s'agit de la correction de Bonferroni pour le seuil (Neter et Wasserman, 1974).

Le coefficient de détermination  $R^2$  utilisé est un coefficient corrigé pour une équation non linéaire (Wilkinson, 1990b dans Wang et Klinka, 1996). Malgré que ce coefficient ne soit pas nécessairement situé entre 0 et 1, il permet tout de même d'exprimer la valeur explicative du modèle (Wang et Klinka, 1996). Finalement, l'indice de qualité de station potentiel ( $IQS_{pot}$ ) a été calculé pour chaque essence par type écologique à partir de l'équation de Chapman-Richards pour un âge de 50 ans.

## 2. Résultats et discussion

### 2.1 Courbes spécifiques par type écologique

La modélisation de la croissance en hauteur en fonction de l'âge pour le sapin baumier, l'épinette blanche et les épinettes noire et rouge a permis de produire 23 courbes spécifiques pour les types écologiques étudiés. Le tableau 6 présente les résultats obtenus concernant le nombre de tiges,  $IQS_{pot}$  et son écart type, les valeurs des trois paramètres de l'équation de Chapman-Richards ainsi que leur écart type respectif. Le paramètre  $b_1$  représente l'asymptote de la courbe et les paramètres  $b_2$  et  $b_3$  les points d'inflexion. Les coefficients de détermination des équations ( $R^2$ ) obtenus varient de 0,87 à 0,97, ce qui permet d'affirmer que le modèle utilisé exprime convenablement la croissance en hauteur en fonction de l'âge de toutes les essences. Les paramètres des équations montrent qu'il existe des différences et des similitudes pour les essences en fonction des types écologiques. De plus, les  $IQS_{pot}$  permettent d'ordonner les types écologiques en fonction de leur potentiel de croissance. Les écarts types calculés nous démontrent cependant qu'il existe une certaine variabilité pour un même type écologique. De plus les coefficients de variation se situant entre 3 et 23% démontrent que la variabilité n'est pas constante d'un type écologique à l'autre. Cependant, il apparaît que les types écologiques mal drainés (RS22 et RC22) présentent généralement une variabilité des  $IQS_{pot}$  plus grande pour chacune des espèces

À la lumière de ces résultats, le sapin baumier et l'épinette blanche présentent des potentiels de croissance semblables. On remarque pour ces espèces que les stations à drainage moyen sur des dépôts relativement épais présentent les  $IQS_{pot}$  les plus élevés. Les  $IQS_{pot}$  varient de 17,9 à 20,2 m pour les types écologiques des érablières à bouleau jaune (FE31, FE32) et des sapinières à bouleau jaune (MS12, MS13). Les types écologiques caractérisés par des dépôts minces et pierreux et aux drainages rapide et lent, montrent des  $IQS_{pot}$  plus faibles variant de 13,1 à 17,3 m. La cédrière à sapin sur dépôts organiques mal drainés (RC22) présente le plus faible niveau de croissance pour le sapin baumier. Cependant, il est un peu étonnant que l' $IQS_{pot}$  le plus faible pour l'épinette blanche soit celui de la sapinière à thuya hydrique (RS22) avec 13,1 m comparativement à la cédrière à sapin pour laquelle l' $IQS_{pot}$  est de 14,4 m. Il est cependant possible, malgré le très mauvais drainage caractéristique de la cédrière à sapin (RC22), que dans certaines situations l'écoulement de l'eau permette d'assurer un bon apport en éléments nutritifs et des conditions favorables à la

croissance sur ces stations, tel que le suggère Larocque et *al.* (1996). Toutefois, cette situation n'est pas observée pour les autres essences.

Tableau 6. IQS<sub>pot</sub> et coefficients de régression par type écologique

Type écologique <sup>a</sup>	n <sup>b</sup>	IQS <sub>pot</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>
Épinette blanche						
MS13	696	20,2 ± 2,0	37,55 ± 2,20	0,0184 ± 0,0015	1,3499 ± 0,0362	0,94
MS12	634	19,8 ± 2,6	34,03 ± 1,79	0,0197 ± 0,0015	1,3054 ± 0,0345	0,92
RS42	147	19,4 ± 3,4	29,21 ± 2,53	0,0234 ± 0,0028	1,2918 ± 0,0614	0,87
FE32	195	19,3 ± 1,3	34,01 ± 3,52	0,0198 ± 0,0030	1,3740 ± 0,0788	0,97
RS11	260	17,3 ± 2,6	29,98 ± 1,90	0,0222 ± 0,0013	1,5772 ± 0,0668	0,95
RS43	105	16,8 ± 1,0	19,35 ± 2,07	0,0388 ± 0,0036	1,4114 ± 0,0892	0,99
RC22	141	14,4 ± 1,8	27,47 ± 3,38	0,0186 ± 0,0032	1,4754 ± 0,1182	0,94
RS22	496	13,1 ± 1,9	22,93 ± 1,44	0,0217 ± 0,0016	1,6106 ± 0,0753	0,94
Épinettes noire et rouge						
RS42	912	17,2 ± 2,6	26,02 ± 1,02	0,0219 ± 0,0010	1,2070 ± 0,0227	0,91
MS12	164	16,2 ± 1,5	34,21 ± 3,24	0,0119 ± 0,0015	1,0363 ± 0,0366	0,93
RS11	291	15,7 ± 1,4	31,80 ± 2,34	0,0152 ± 0,0015	1,2594 ± 0,0444	0,96
RS43	797	14,4 ± 1,5	34,15 ± 2,40	0,0114 ± 0,0012	1,1489 ± 0,0305	0,95
RS22	312	13,1 ± 1,8	27,77 ± 2,65	0,0155 ± 0,0020	1,3908 ± 0,0725	0,92
RC22	1758	11,1 ± 2,0	32,16 ± 1,18	0,0096 ± 0,0005	1,2318 ± 0,0246	0,91
Sapin baumier						
FE32	1687	19,2 ± 1,8	29,15 ± 0,88	0,0257 ± 0,0015	1,5134 ± 0,0463	0,93
MS12	596	19,2 ± 2,4	38,90 ± 1,50	0,0146 ± 0,0009	1,1820 ± 0,0193	0,89
MS13	1229	19,2 ± 1,9	38,70 ± 2,01	0,0153 ± 0,0012	1,2348 ± 0,0259	0,94
FE31	165	17,9 ± 0,6	22,43 ± 0,81	0,0314 ± 0,0028	1,2929 ± 0,0642	0,97
RS42	407	16,8 ± 1,9	38,72 ± 4,05	0,0120 ± 0,0019	1,1569 ± 0,0401	0,92
RS43	596	16,3 ± 3,2	54,15 ± 7,41	0,0073 ± 0,0014	1,0782 ± 0,0304	0,84
RS11	631	16,2 ± 2,1	32,86 ± 1,90	0,0158 ± 0,0015	1,3032 ± 0,0403	0,90
RS22	610	13,7 ± 2,6	55,37 ± 11,01	0,0058 ± 0,0016	1,0873 ± 0,0381	0,88
RC22	283	11,1 ± 2,6	61,98 ± 23,21	0,0040 ± 0,0020	1,0798 ± 0,0584	0,91

<sup>a</sup> FE31 : érablière à bouleau jaune et hêtre ; FE32 : érablière à bouleau jaune ; MS12 sapinière à bouleau jaune mésique ; MS13 sapinière à bouleau jaune subhydrique ; RC22 cédrière à sapin ; RS11 sapinière à thuya xérique ; RS22 sapinière à thuya hydrique ; RS42 sapinière à épinette rouge mésique ; RS43 : sapinière à épinette rouge hydrique, <sup>b</sup> nombre de couples hauteur-âge.

En ce qui concerne les épinettes noire et rouge, les mêmes tendances générales s'appliquent, sauf que le meilleur potentiel de croissance obtenu est celui du type écologique de la sapinière à épinette rouge mésique (RS42) avec un  $IQS_{pot}$  de 17,2 m. Il faut toutefois admettre que le faible échantillonnage réalisé dans le type écologique de la sapinière à bouleau jaune mésique (MS12) ne permet pas de bien évaluer le potentiel de ces espèces sur cette station, où l'on aurait pu s'attendre à un  $IQS_{pot}$  plus élevé que celui de la sapinière à épinette rouge mésique (RS42). Ce faible échantillonnage résulte du faible taux de fréquence rencontré sur le terrain pour ces espèces pour ce type écologique. Ce phénomène peut s'expliquer par la faible compétitivité des épinettes noire et rouge par rapport au sapin baumier sur ces stations. En effet, il semble que ces espèces tolèrent moins bien l'ombre que le sapin baumier, bien qu'il existe certaines divergences à ce sujet en ce qui concerne l'épinette rouge (Burns et Honkala, 1990). Le sapin baumier aurait également une meilleure croissance suite à la libération comparativement à l'épinette rouge (Hart, 1968).

Les courbes hauteur-âge spécifiques obtenues à partir de la modélisation des données brutes sont présentées à la figure 6. Elles permettent de visualiser les différences et les similitudes entre les types écologiques. La majorité des courbes présentent des formes similaires, bien que les stations les moins fertiles affichent une courbe de forme plus linéaire que les stations plus fertiles. Il existe cependant deux exceptions. Pour l'épinette blanche, la courbe représentant la croissance en hauteur du type écologique de la sapinière à épinette rouge hydrique (RS43) présente une asymptote plus faible que les autres courbes des types écologiques pour cette essence. Cette forme s'explique probablement par le manque d'observations après l'âge de 50 ans. Toutefois, il est possible que les caractéristiques stationnelles puissent expliquer cette différence. Rappelons que ce type écologique (RS43) est caractérisé par un mauvais drainage et des dépôts de texture grossière pouvant empêcher le développement en profondeur du système racinaire et entraver la croissance puisque les racines ne peuvent puiser l'eau en profondeur lors des baisses de la nappe phréatique (Schmidt et Carmean, 1988). Une forme de croissance semblable s'observe pour la courbe hauteur-âge du sapin baumier du type écologique de l'érablière à bouleau jaune et hêtre (FE31). Toutefois, dans ce cas, mis à part le manque d'observations, les caractéristiques de la station et la compétition exercée par les espèces feuillues peuvent expliquer la forme de la courbe. En effet, le drainage rapide et les dépôts minéraux minces observés dans ces stations, jumelés au surcimage occasionné par les essences feuillues peuvent expliquer cette différence de forme. Cette diminution de croissance pourrait être attri-

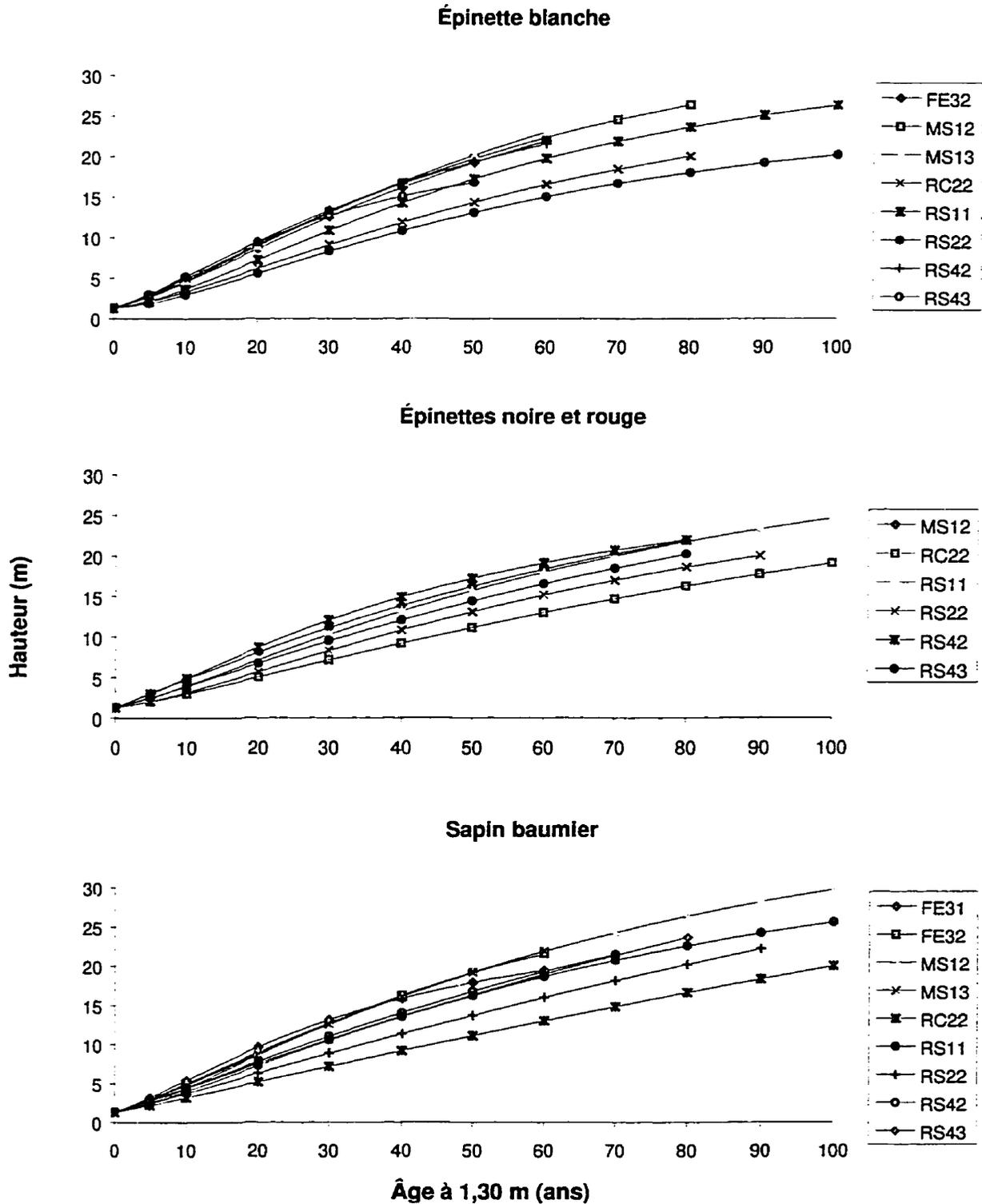


Figure 6. Courbes hauteur-âge par type écologique.

FE31 : Érablière à bouleau jaune et hêtre ; FE32 : Érablière à bouleau jaune ; MS12 : Sapinière à bouleau jaune mésique ; MS13 Sapinière à bouleau jaune subhydrique ; RC22 : Cédrière à sapin ; RS11 : Sapinière à thuya xérique ; RS22 : Sapinière à thuya hydrique ; RS42 : Sapinière à épinette rouge mésique ; RS43 : Sapinière à épinette rouge hydrique.

buable en partie aux sols minces généralement observés pour ce type écologique. Cette situation occasionne une contrainte d'espace pour le développement racinaire et un manque de lumière dû à la compétition exercée par les essences feuillues. Un échantillonnage plus élaboré serait cependant nécessaire pour vérifier la justesse de ces hypothèses.

## **2.2 Étude comparative des types écologiques**

Les résultats des études comparatives entre la croissance des types écologiques réalisées grâce aux tests de Wald pour un seuil global de 5 % sont présentés pour chacune des espèces au tableau 7. On remarque qu'il existe des différences significatives de croissance entre plusieurs types écologiques. En contrepartie, il semble que certains présentent des similitudes. Malgré que les résultats des tests de Wald présentent des différences statistiquement significatives, quelques types écologiques ont tout de même été regroupés puisqu'ils présentent des caractéristiques écologiques et une croissance similaires. L'utilisation des tests de Wald assure cependant la distinction des types écologiques présentant des courbes hauteur-âge différentes puisqu'ils s'appuient non seulement sur l' $IQS_{pot}$  mais également sur la forme de la courbe.

Dans d'autres cas, les seuils observés pour la comparaison des courbes suggèrent le regroupement de certains types écologiques. Dans certaines circonstances, la courbe moyenne, l' $IQS_{pot}$  et les caractéristiques stationnelles de certains types écologiques suggèrent tout de même une différence marquée même si le test de Wald n'en détecte pas. C'est le cas des types écologiques présentant une grande variabilité de croissance attribuable, d'une part, au nombre restreint d'observations et, d'autre part, aux types écologiques ayant des conditions stationnelles moins homogènes. L'analyse des différents résultats obtenus pour la comparaison de la croissance entre les types écologiques a permis le regroupement de certains d'entre eux. Le tableau 8 présente les regroupements effectués, les  $IQS_{pot}$  et les paramètres des courbes synthèses par essence. De plus, la figure 7 présente les courbes synthèses obtenues suite aux regroupements. Ces regroupements sont discutés dans les paragraphes qui suivent pour chaque essence.

Tableau 7. Seuils observés des comparaisons des courbes hauteur-âge par type écologique

Type écologique <sup>a</sup>	FE31	FE32	MS12	MS13	RC22	RS11	RS22	RS42
Épinette blanche								
MS12	–	0.3036						
MS13	–	0.7555	0.0081					
RC22	–	0.0004	0.0001*	0.0001*				
RS11	–	0.0184	0.0001*	0.0004*	0.1121			
RS22	–	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.5724	0.0014		
RS42	–	0.0023	0.0301	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*	
RS43	–	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*
Épinettes noire et rouge								
RC22	–	–	0.0001*	–				
RS11	–	–	0.0001*	–	0.0001*			
RS22	–	–	0.0001*	–	0.0099	0.0015		
RS42	–	–	0.0001*	–	0.0001*	0.0001*	0.0001*	
RS43	–	–	0.0001*	–	0.0001*	0.0774	0.0009*	0.0001*
Sapin baumier								
FE32	0.0001*							
MS12	0.0001*	0.0001*						
MS13	0.0001*	0.0001*	0.0589					
RC22	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*				
RS11	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*			
RS22	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.6567	0.0001*		
RS42	0.0001*	0.0001*	0.0034	0.0004*	0.0023	0.0460	0.0317	
RS43	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0919	0.0001*	0.3382	0.2610

<sup>a</sup> FE31 : érablière à bouleau jaune et hêtre ; FE32 : érablière à bouleau jaune ; MS12 : sapinière à bouleau jaune mésique ; MS13 sapinière à bouleau jaune subhydrique ; RC22 cédrière à sapin ; RS11 sapinière à thuya xérique ; RS22 sapinière à thuya hydrique ; RS42 sapinière à épinette rouge mésique ; RS43 : sapinière à épinette rouge hydrique, (\*) indique une différence significative au seuil global de 0,05.

Tableau 8. IQS<sub>pot</sub> et coefficients des courbes hauteur-âge par groupe de types écologiques

Gr. <sup>a</sup>	Types écologiques <sup>b</sup>	n <sup>c</sup>	IQS <sub>pot</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>			
Épinette blanche										
A	FE32,MS12,MS13,RS42	1672	19,8	34,60 ± 1,16	0,0197 ± 0,0009	1,3312 ± 0,0224	0,93			
B	RS11	637	17,2	29,99 ± 1,92	0,0222 ± 0,0014	1,5774 ± 0,0672	0,95			
C	RS43	260	16,8	19,35 ± 2,09	0,0388 ± 0,0037	1,4112 ± 0,0896	0,99			
D	RC22,RS22	105	13,4	23,89 ± 1,32	0,0210 ± 0,0014	1,5760 ± 0,0635	0,93			
Épinettes noire et rouge										
A	RS42	912	17,2	26,02 ± 1,02	0,0219 ± 0,0010	1,2069 ± 0,0227	0,93			
B	MS12	164	16,2	34,22 ± 3,24	0,0119 ± 0,0015	1,0363 ± 0,0366	0,91			
C	RS11,RS43	1088	14,8	32,65 ± 1,63	0,0129 ± 0,0009	1,1904 ± 0,0254	0,95			
D	RS22	312	13,1	27,78 ± 2,66	0,0155 ± 0,0020	1,3907 ± 0,0726	0,92			
E	RC22	1758	11,1	32,17 ± 1,18	0,0096 ± 0,0005	1,2317 ± 0,0246	0,91			
Sapin baumier										
A	FE32,MS12,MS13	3512	19,2	36,70	0,89	0,0164	0,0007	1,2375	0,0146	0,91
B	FE31	165	17,9	22,45	0,81	0,0314	0,0028	1,2917	0,0646	0,97
C	RS11,RS42,RS43	1634	16,4	41,88	2,37	0,0107	0,0009	1,1562	0,0207	0,87
D	RS22	610	13,7	57,07	11,78	0,0056	0,0016	1,0823	0,0377	0,88
E	RC22	283	11,1	64,08	24,91	0,0038	0,0020	1,0755	0,0578	0,91

<sup>a</sup> lettre identifiant le regroupement <sup>b</sup> FE31 : érablière à bouleau jaune et hêtre ; FE32 : érablière à bouleau jaune ; MS12 : sapinière à bouleau jaune mésique ; MS13 : sapinière à bouleau jaune subhydrique ; RC22 : cédrière à sapin ; RS11 : sapinière à thuya xérique ; RS22 : sapinière à thuya hydrique ; RS42 : sapinière à épinette rouge mésique ; RS43 : sapinière à épinette rouge hydrique, <sup>c</sup> nombre de couples hauteur-âge.

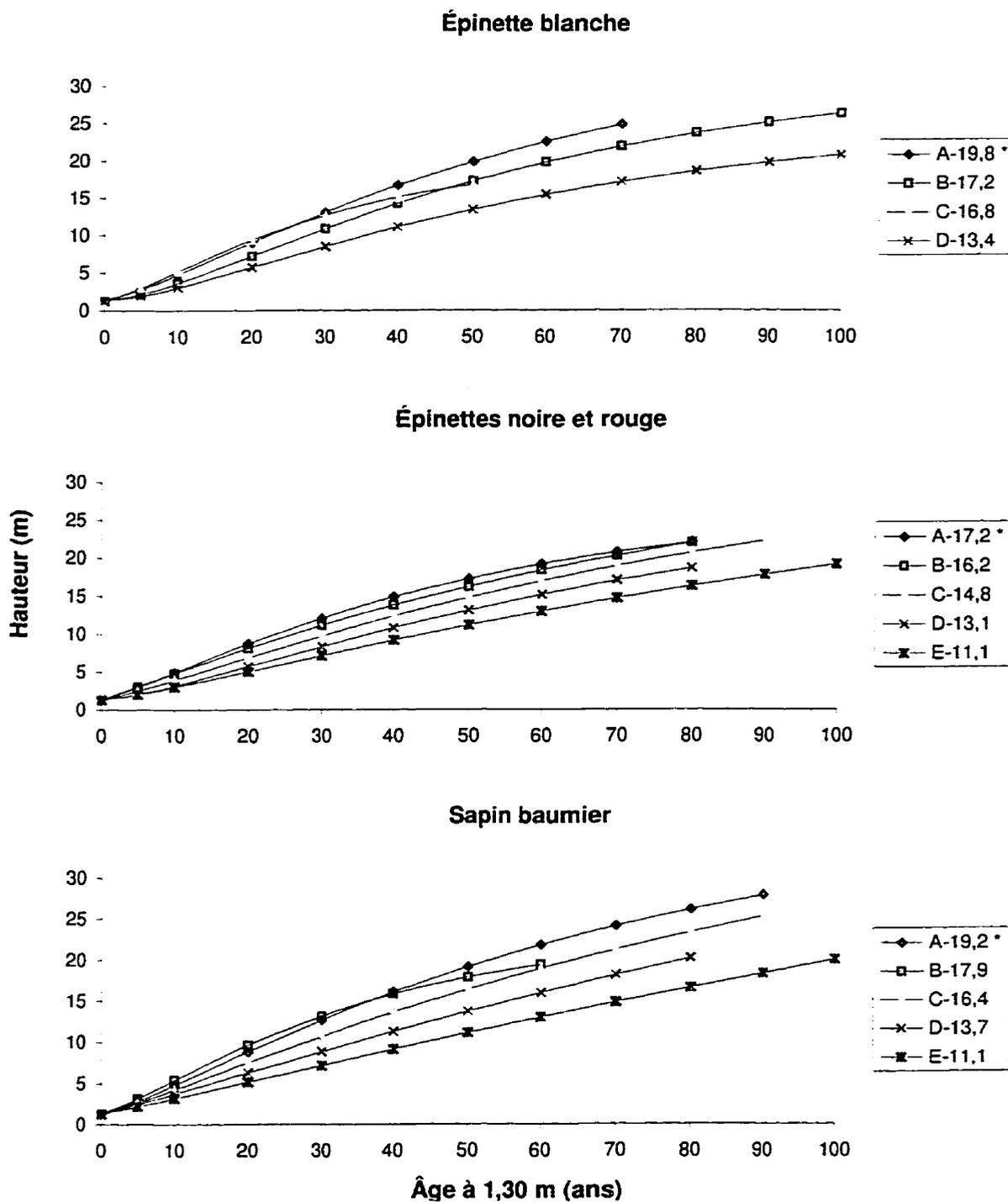


Figure 7. Courbes hauteur-âge synthèses et indice de qualité de station potentiel.

\* la lettre indique le groupe présenté au tableau 8 et l'IQS<sub>pot</sub> suit le tiret (-)

### 2.2.1 Épinette blanche

Pour l'épinette blanche, quatre  $IQS_{pot}$  ont été retenus. La station la plus fertile présente un  $IQS_{pot}$  de 19,8 m et est formée des types écologiques de l'érablière à bouleau jaune (FE32), des sapinières à bouleau jaune mésique et subhydrique (MS12, MS13) ainsi que de la sapinière à épinette rouge mésique (RS42). Bien que les trois premiers types écologiques présentent des caractéristiques physiques (type de dépôt, classe de drainage) et floristiques (espèces indicatrices) semblables, la sapinière à épinette rouge (RS42) s'y distingue par un groupe écologique différent et cette station se trouve sur des dépôts plus pierreux et sablonneux généralement moins fertiles. Un échantillonnage plus important serait cependant nécessaire afin de confirmer le regroupement de ce dernier type écologique avec les meilleures stations de l'épinette blanche. En effet, en tenant compte de ses caractéristiques, la sapinière à épinette rouge devrait présenter une croissance plus faible que les autres types écologiques formant ce groupe. Cependant, il faut considérer que l'épinette blanche n'est pas très abondante sur ce type de station (RS42) où le sapin baumier, l'épinette rouge et l'épinette noire dominent (Grondin et *al.* 1995b). Les stations de fertilité moyenne présentent des  $IQS_{pot}$  de 17,2 et 16,8 m. Il s'agit respectivement de la sapinière à thuya xérique (RS11) et de la sapinière à épinette rouge hydrique (RS43). Bien que ces deux types écologiques aient des  $IQS_{pot}$  semblables, ils présentent tout de même des différences de croissance significatives. Néanmoins, il faut noter que leur faible taux d'échantillonnage ne permet pas de vérifier la validité des résultats obtenus. Le quatrième et dernier groupe est formé des types écologiques de la sapinière à thuya hydrique et de la cédrière à sapin (RC22) puisqu'ils ne présentent pas de différences significatives de croissance. Cette situation peut s'expliquer par le manque de données relatives à la croissance de l'épinette blanche pour la cédrière à sapin (RC22). Il est tout de même étonnant de constater que ce type écologique présente un  $IQS_{pot}$  supérieur à celui de la sapinière à thuya (RS22). Mais pour les raisons discutées plus haut, il est possible que dans certaines situations les dépôts organiques offrent une bonne fertilité.

### 2.2.2 Épinettes noire et rouge

L'analyse des seuils présentés au tableau 7 concernant les épinettes noire et rouge permet de vérifier que les types écologiques de la sapinière à bouleau jaune mésique (MS12) et de la

sapinière à épinette rouge mésique (RS42) se distinguent des autres types écologiques. Ce dernier type écologique présente le meilleur potentiel de croissance avec un  $IQS_{pot}$  de 17,2 m. La deuxième type écologique est celui de la sapinière à bouleau jaune (MS12) avec un  $IQS_{pot}$  de 16,2 m. Le troisième groupe est formé de la sapinière à thuya xérique (RS11) et de la sapinière à épinette rouge hydrique (RS43) et présente un  $IQS_{pot}$  de 14,8 m. Les résultats concernant ces deux types écologiques diffèrent de ceux obtenus pour l'épinette blanche. Cependant, le nombre d'observations considérées ici permet d'obtenir une meilleure confiance en ces résultats. Le type écologique de la sapinière à épinette rouge hydrique (RS43) présente un  $IQS_{pot}$  inférieur à la sapinière à thuya xérique (RS11), mais le test de Wald indique que cette différence n'est pas statistiquement significative. Bien qu'ils se retrouvent dans des conditions écologiques différentes, ces types écologiques présentent tout de même des similitudes. Ils présentent également des contraintes de développement racinaire dues à la nature des dépôts les supportant et à la classe de drainage. Le type écologique de la sapinière à épinette rouge hydrique (RS43) est généralement rencontré sur des tills délavés très pierreux ou sur des dépôts sablonneux et mal drainés tandis que la sapinière à thuya xérique (RS11) se trouve habituellement sur des tills ou des dépôts d'altérations minces à drainage rapide. Finalement, les types écologiques de la sapinière à thuya (RS22) et de la cédrière à sapin (RC22) n'ont pas été regroupés bien qu'ils ne présentent pas de différences significatives selon le test de Wald. Cependant, leurs  $IQS_{pot}$  respectifs de 13,1 et de 11,1 m présentent une différence de 2 m ce qui est plus important que dans le cas de l'épinette blanche où la différence n'était que de 1,3 m entre ces deux stations. De plus, il faut considérer que leurs caractéristiques stationnelles sont différentes. Le premier (RS22) étant caractérisé par des dépôts minéraux et un mauvais drainage tandis que le second est caractérisé par des dépôts organiques très mal drainés.

### 2.2.3 Sapin baumier

Le sapin baumier est la seule essence présente sur l'ensemble des stations étudiées, ce qui en fait l'essence la plus intéressante pour comparer la croissance entre les types écologiques. Bien que les comparaisons statistiques des courbes montrent des différences significatives entre plusieurs types écologiques, l'examen des  $IQS_{pot}$  présentés au tableau 6 et les courbes de la figure 6 suggèrent le regroupement de certains d'entre eux. Cette analyse a permis la formation de cinq groupes distincts pour le sapin baumier (tableau 8 et figure 7). Le premier groupe est formé de l'érablière à bouleau jaune (FE32) et des sapinières

à bouleau jaune (MS12, MS13), avec un  $IQS_{pot}$  de 19,2 m. Ces types écologiques présentent des caractéristiques communes au point de vue du type de dépôt, du régime hydrique et des espèces indicatrices. Bien que le type écologique de la sapinière à bouleau jaune subhydrique profite généralement d'un enrichissement du sol par la présence d'écoulement latéral de l'eau, les résultats des tests de Wald n'indiquent aucune différence significative avec les autres types écologiques de ce groupe (tableau 7). Ce dernier présente tout de même l' $IQS_{pot}$  spécifique le plus élevé (tableau 6). Le type écologique de l'érablière à bouleau jaune et hêtre présente un  $IQS_{pot}$  de 17,9 m, ce qui permet de le classer au deuxième rang. Il affiche toutefois une forme de croissance différente, bien que la courbe hauteur-âge suit d'assez près le premier groupe jusqu'à l'âge de 40 ans. Cependant, comme il a été discuté plus haut, le manque d'observations pour ce type écologique ne nous permet pas de vérifier la validité de ces résultats bien que la faible épaisseur des dépôts, le drainage rapide et la dominance des espèces feuillues sur ces stations soient des hypothèses plausibles pour expliquer cette différence. Le troisième groupe est formé des types écologiques de la sapinière à thuya xérique (RS11) et des sapinières à épinette rouge mésique et hydrique (RS42 et RS43). Ce groupe se caractérise par la présence du groupe écologique PLS. Bien que la sapinière à thuya hydrique (RS22) ne présente pas de différence significative avec la cédrière à sapin, deux  $IQS_{pot}$  ont tout de même été retenus considérant les différences écologiques de ces stations et la différence de 2,6 m entre leurs  $IQS_{pot}$  respectifs.

### ***2.3 Comparaison des courbes obtenues avec les courbes de Ker et Bowling***

Afin de pouvoir vérifier la validité des courbes obtenues, une comparaison graphique avec les courbes d'indices de station de Ker et Bowling (1991) a été retenue. Le choix des travaux de ces auteurs, pour la comparaison des courbes, est fondé, dans un premier temps, sur la proximité du territoire concerné par cette étude (Nouveau-Brunswick). Le second facteur considéré est la similitude des types de stations échantillonnées. En troisième lieu, la même technique d'échantillonnage a été utilisée, soit l'analyse complète de tiges. Le quatrième facteur motivant ce choix est l'utilisation d'une équation dérivée de la fonction de Chapman-Richards. Enfin, l'âge à 1,30 m a été retenu pour produire les courbes hauteur-âge. La figure 8 présente les courbes synthèses et celles de Ker et Bowling pour un même  $IQS$  pour chacune des espèces étudiées. De façon générale, mis à part les courbes présentant une forme particulière dont il a été discuté plus haut, la forme des courbes obtenues coïncide

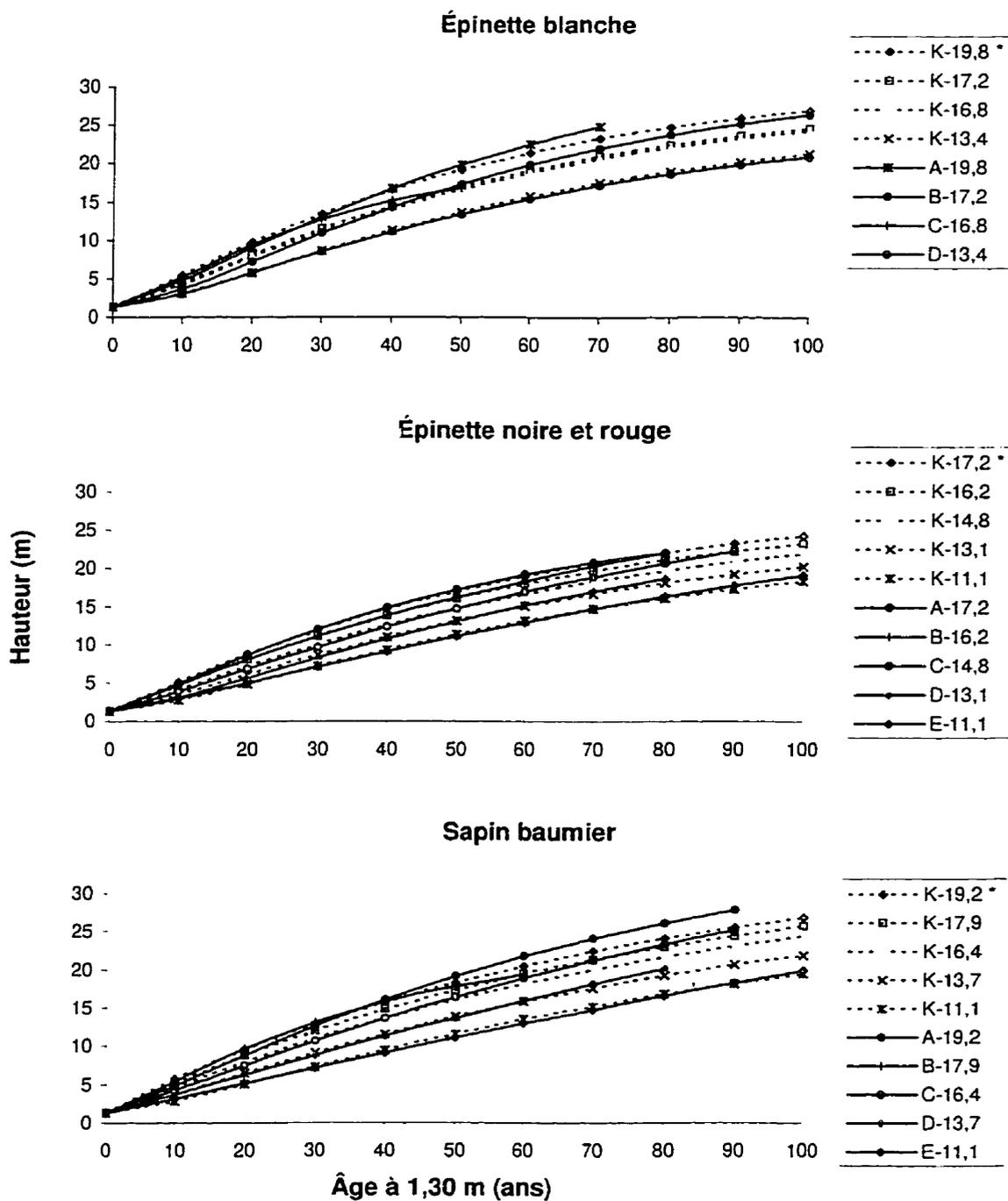


Figure 8. Comparaison des courbes hauteur-âge synthèses à celles de Ker et Bowling (1991).

La lettre indique l'origine de la courbe : K=Ker et Bowling et les lettres A à E réfères aux groupes présentés au tableau 8, l'IQS suit le tiret (-).

assez bien avec celles de Ker et Bowling, du moins, en partie. Pour les épinettes noire et rouge, les courbes obtenues sont cependant très rapprochées de celles de Ker et Bowling sur presque l'ensemble des périodes considérées. Cependant, pour l'épinette blanche et le sapin baumier, certaines courbes des stations les plus fertiles se démarquent par des valeurs plus élevées après 50 ans. Certaines de ces courbes croisent même les courbes d'IQS supérieurs. Il s'agit de la courbe du groupe B ( $IQS_{pot}=17,2$  m) pour l'épinette blanche, également celle du groupe B ( $IQS_{pot}=16,2$  m) pour les épinettes noire et rouge et de la courbe du groupe C ( $IQS_{pot}=16,4$  m) pour le sapin baumier

Ces différences peuvent être attribuables en partie à l'ajustement effectué pour les tiges présentant des pertes de croissance dues à la défoliation causée par les épidémies de TBÉ. En effet, les courbes de Ker et Bowling ont été obtenues à partir de tiges ayant subi les attaques des épidémies de TBÉ. Il est probable que l'ajustement réalisé a pour conséquence d'augmenter la valeur prédite de l'asymptote puisque la dernière épidémie de TBÉ s'est produite dans les dernières années des valeurs observées. Malgré cette hypothèse, il faut rappeler que l'ajustement effectué pour les périodes de défoliation ne semblaient cependant pas causer de biais. En effet, la comparaison graphique entre les courbes hauteur-âge ajustées et celles obtenues à partir des tiges non affectées par la TBÉ n'indique pas une surestimation de la croissance. La deuxième hypothèse pouvant expliquer ces différences réside dans le nombre plus restreint de couples hauteur-âge après la période de 50 ans. Conséquemment, la variation de la valeur prédite après cette période est plus grande. Finalement, les différences pour une même espèce en fonction des stations indiqueraient qu'il existe vraisemblablement des schémas de croissance spécifique à la station comme l'a suggéré Monserud (1984).

## **2.4 Synthèse des résultats**

L'analyse des résultats obtenus et le regroupement des types écologiques, présentés dans la section précédente, a permis de définir 5 indices synthèses de croissance. Le tableau 9 présente les indices retenus et permet de vérifier les liens existant avec les caractéristiques des stations. Ces indices varient de très élevé à très faible et s'inspirent des travaux de Grondin et *al.* (1993). Ils sont définis à partir des indices de qualité de station synthèses déjà présentés au tableau 8. Mis à part les résultats obtenus à partir de moins de 10 observations (identifiés par deux astérisques (\*\*)) au tableau 9) qui semblent produire une certaine

hétérogénéité dans quelques types écologiques, il est possible d'attribuer un indice synthèse pour chacun des types écologiques (tableau 9).

En regard de cet indice, on observe une hiérarchie entre les types écologiques. Les stations mésiques des érablières à bouleau jaune et des sapinières à bouleau jaune (FE31, FE32, MS12, MS13) présentent un indice synthèse variant d'élevé à très élevé. Les stations mésiques des sapinières à épinette rouge et des sapinières à thuya présentent des indices de croissance variant de modéré à élevé selon les essences considérées. En effet, seules les épinettes noire et rouge du type écologique de la sapinière à épinette rouge mésique (RS42) présentent un indice élevé dans ce groupe. Le type écologique de la sapinière à thuya hydrique (RS22) présente un indice faible et la station très mal drainée de la cédrière à sapin (RC22) présente un indice très faible. Ces résultats démontrent bien l'importance des facteurs écologiques sur le potentiel de croissance des stations. La hiérarchie observée est comparable à celle obtenue par Saucier (1992, 1993), Grondin et *al.* (1993), Bélanger et *al.* (1995) et Tremblay (1996) pour les stations possédant des caractéristiques écologiques semblables.

## **2.5 Utilisations possibles des résultats**

Malgré l'ordination des stations à l'aide d'indices de croissance synthèses, les IQS<sub>pot</sub> obtenus montrent des différences de croissance selon les espèces pour un même type écologique, tout comme l'ont observé Grondin et *al.* (1993), Saucier (1992) et Zelazny et *al.* (1989). Ces résultats démontrent l'importance de considérer le potentiel de chaque espèce lorsque l'on veut modéliser la croissance d'un peuplement. De plus, la connaissance du potentiel de croissance de chaque espèce sur une même station est un élément utile au choix des essences à favoriser lors de la planification des interventions sylvicoles. Contrairement aux études conventionnelles, où la hauteur est prédite en fonction de l'âge et de l'IQS, les courbes d'indice de station obtenues dans cette étude permettent de prédire la croissance en hauteur en fonction de l'âge à l'aide des variables écologiques. Ce remplacement de l'IQS par des variables écologiques est basé sur l'hypothèse que les effets de ces variables peuvent être représentés adéquatement dans les modèles de croissance sans avoir à utiliser l'IQS (Wykoff et Monserud, 1987). L'application la plus importante de cette méthode est de pouvoir prédire la hauteur à n'importe quel âge par relation avec les facteurs de stations

Tableau 9. Synthèse des résultats

Principales caractéristiques écologiques des stations étudiées										
Type écologique (code) <sup>a</sup>	RS44 (RS11)	FE32 (FE31)	MS12	MS13	RS22	RC22	RS43	RS42		
Végétation potentielle	Sapinière à épinette rouge (thuya) xérique	Érablière à bouleau jaune mésique	Sapinière à bouleau jaune mésique	Sapinière à bouleau jaune subhydrique	Sapinière à thuya hydrique	Cédrrière à sapin sur tourbe minérotrophe	Sapinière à épinette rouge hydrique	Sapinière à épinette rouge mésique		
Dépôt (code) <sup>b</sup>	Minéral mince ou roc (M1A, R1A, R)	Minéral épais (1A, 1AY)	Minéral épais (1A, 1AY, 1AM)	Minéral épais (1A, 1AY)	Minéral épais (1A, 1AY)	Organique (7T, 7E)	Minéral épais (1A, 1AD, 2BE, 3AN)	Minéral épais (1A, 1AD, 2BE, 3AN)		
Drainage (classe) <sup>c</sup>	Xérique (10)	Mésique (20,30)	Mésique (20,30)	Hydrique (31,41)	Hydrique (41,51)	Hydrique (61)	Hydrique (40,50)	Mésique (20,30)		
Groupe écologique <sup>d</sup>	PLS-VAA	ERP	ERE	ERE-RUP	ERE-RUP	ERE-RUP-AUR	PLS-VAA-SPS	PLS-VAA		
Indices de croissance synthèses et IQS <sub>pot</sub> ( ) <sup>e</sup>										
Sensibilité	EPB	E (17,2)**	TE (19,8)**	TE (19,8)	TE (19,8)	F (13,4)**	F (13,4)	E (16,8)**	TE (19,8)**	
	EPX	M (14,8)	-	M (16,2)**	-	F (13,1)	TF (11,1)	M (14,8)	E (17,2)	
	SAB	-	TE (19,2) (E (17,9)**)	TE (19,2)	TE (19,2)	F (13,7)	TF (11,1)	M (16,4)	M (16,4) (M (16,4))	
Indice synthèse	M	TE	TE	TE	F	TF	M	M à E		

<sup>a</sup> ( ) indique un type écologique rare possédant une répartition géographique particulière ; <sup>b</sup> selon Robitaille (1988) <sup>c</sup> selon Saucier et al. (1994) ; <sup>d</sup> voir tableau 1 pour description des groupes. <sup>e</sup> TE : très élevé ; E : élevé ; M : modéré ; F : faible, TF : très faible ; (-) : indique des données non disponibles ; <sup>a</sup> EPB : épinette blanche ; EPX : épinette noire et rouge ; SAB : sapin baumier, (\*\*) indique que les résultats sont basés sur moins de 10 observations.

(Wang et Klinka, 1995 ; Rondeux, 1993). Cette application est particulièrement intéressante lorsque l'on veut prédire la croissance des peuplements en régénération pour lesquels aucune variable dendrométrique n'est mesurable.

D'autres utilisations sont également possibles lorsque le développement de ces modèles est réalisé à l'intérieur d'un cadre écologique. En effet, en plus de la classification écologique, la réalisation d'une cartographie écologique est essentielle pour favoriser l'utilisation de l'information écologique par l'aménagiste. La cartographie est nécessaire puisque la planification de l'aménagiste doit généralement porter sur un vaste territoire et il lui est essentiel de connaître les superficies de chacune des stations. À titre d'exemple, une des applications des plus intéressantes pour l'aménagiste, liant classification des écosystèmes, études de croissance et cartographie écologique, réside dans le regroupement des strates cartographiques. En effet, au Québec la prédiction des volumes de bois est basée sur les regroupements de strates forestières qui ont été préalablement cartographiées. Dans l'objectif de prédire la croissance futur de ces strates, l'aménagiste doit estimer l'IQS afin de choisir la table de production la plus adéquate. En procédant au regroupement des strates selon les caractéristiques écologiques des stations et leur potentiel de croissance, le travail est simplifié et le niveau de confiance des résultats devrait être augmenté. Cette approche permet la formation de stations forestières à partir d'un cadre phytosociologique exprimant la composition floristique et la dynamique temporelle des forêts et d'un cadre dendrométrique caractérisant, par des valeurs statistiques, la production forestière tel que proposées dans la Stratégie de protection des forêts du Québec (Ministère des Ressources naturelles, 1994).

## Conclusion

Cette étude présente une approche permettant d'évaluer et de comparer la croissance potentielle en fonction des types écologiques pour les principales espèces du sous-domaine de l'Est de la sapinière à bouleau jaune en utilisant la relation hauteur-âge. Les comparaisons des courbes, représentant cette relation, démontrent qu'il existe des différences significatives de croissance potentielle entre les types écologiques étudiés. La croissance potentielle a été déterminée à l'aide d'analyses de tiges, permettant ainsi la correction des périodes d'oppressions dans la phase juvénile et également la correction des retards de croissance occasionnés par les épidémies de tordeuses des bourgeons de l'épinette. L'âge corrigé permet d'estimer la croissance que l'on peut théoriquement espérer pour une station donnée. Ce potentiel ne pourra être atteint que si l'on pratique des interventions sylvicoles permettant de réduire au maximum les pertes de croissance des arbres causées par des facteurs externes non liés à la qualité stationnelle. Les  $IQS_{pot}$  obtenus doivent être considérés comme étant un objectif à atteindre et non pas le reflet de la croissance de la forêt naturelle.

Les comparaisons des courbes hauteur-âge ont permis de former des groupes ayant une croissance potentielle semblable et de leur attribuer un indice de qualité de station par essence et un indice synthèse de croissance. Ces groupes devraient permettre de préciser davantage le concept de station forestière par une connaissance de leur potentiel de croissance. Le regroupement basé uniquement sur la croissance potentielle nous démontre que le niveau de détail du type écologique est trop élevé puisque certains types écologiques possèdent une croissance similaire. Cependant, cette observation ne remet pas en question l'utilisation du type écologique comme unité descriptive et servant de base à la définition des stations forestières. Celui-ci peut être utilisé afin de caractériser la station forestière en ce qui concerne les autres contraintes et potentiels pour la sylviculture. Il serait donc souhaitable que des études portant sur la dynamique temporelle, les contraintes d'aménagement et la réponse aux traitements sylvicoles s'ajoutent aux études de croissance de la forêt naturelle afin d'améliorer la connaissance des stations forestières.

## Références

- Assman, E. 1970. The principle of forest yield study. Pergamon Press, New York, 506 p.
- Bégin, J. 1996. Anatige. Programme de compilation des données du logiciel Windendro. Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec.
- Bélanger, L. 1985. Intégration de l'information écologique dans la gestion des terres de l'écoumène forestier par l'inventaire écologique des terres, Thèse de doctorat, Faculté de foresterie et géodésie., Université. Laval, Québec, 602 p.
- Bélanger, L. S. Paquette, S. Morel, J. Bégin, P. Meek, L. Bertrand, P. Beauchesne, S. Lemay et M. Pineau. 1995. Indices de qualité de station du sapin baumier dans le sous-domaine écologique de la sapinière à bouleau blanc humide. For. Chron., 71 :317-325.
- Bergeron, Y., A. Bouchard, P. Gangloff et C. Camiré, 1983. La classification écologique des milieux forestiers de la partie ouest des cantons d'Hébertcourt et de Roquemaure, Abitibi, Québec, Études Écologiques no 9, Lab. d'écologie forestière, Univ. Laval, Québec, 169 p.
- Blais, J. R. et R. Martineau. 1960. A recent spruce budworm outbreak in the lower St. Lawrence and Gaspé Peninsula with reference to aerial spraying operations, For. Chron. 36 : 209-224.
- Blais, J. R. 1961. Spruce budworm outbreaks in the Lower St. Lawrence and Gaspé Regions. For. Chron. 37 :192-202.
- Blais, J. R. 1983. Trends in the frequency, extent and severity of spruce budworm outbreak in eastern Canada, Can. J. For. Res. 13 : 539-547.
- Blouin, J.-L. et M.M. Grandtner, 1971. Étude écologique et cartographie de la végétation du comté de Rivière-du-Loup. Service de la recherche., Ministère des Terres. et Forêts, Québec, Mémoire no 6, 371 p.
- Bordeleau, C., D. Guérin, L. Innes, D. Lachance et R. Picher. 1989. Insectes et maladies des arbres-Québec 1988, Forêt Conservation 57 (1) :3-6.
- Bordeleau, C., D. Guérin, L. Innes et D. Lachance. 1990. Insectes et maladies des arbres - Québec 1989, Forêt Conservation 56 (1) :3-5.
- Bordeleau, C. et M. Auger. 1991. Insectes et maladies des arbres-Québec-1990, Gouv. du Québec, Min. des Forêts, 3-5.
- Bordeleau, C. et M. Auger. 1992. Insectes et maladies des arbres-Québec-1991, Gouv. du Québec, Min. des Forêts, 3-5.
- Bordeleau, C. 1993. Insectes et maladies des arbres-Québec-1992, Gouv. du Québec, Min. des Forêts, 3-5.

- Boudoux, M. 1978. Tables de rendement empiriques pour l'épinette noire, le sapin baumier et le pin gris au Québec. Ministère des Terres et Forêts, Gouvernement du Québec, Québec, 101 p.
- Burns, R. M. et B. H. Honkala, 1990. *Silvics of North America*, volume 1, Conifers, USDA, Forest Service, Washington, DC, 675 p.
- Carmean, W. H., 1975. Forest site quality evaluation in the United States. *Adv. Agron.* 27 : 209-269.
- Carmean, W. H., et D. J. Lenthall. 1989. Height-growth and site index curves for jack pine in north central Ontario. *Can. J. For. Res.* 19 :215-224.
- Conseil de la recherche forestière du Québec. 1995. Le secteur forestier québécois face à ses défis : des orientations de recherche et de développement. Conseil de la recherche forestière du Québec, Québec, 47 p.
- Davis, L. S. et K. N. Johnson, 1987. *Forest Management*. Third edition, McGraw-Hill éditeurs, New-York, 790 p.
- Decourt, N. 1973. Production primaire, production utile : méthode d'évaluation, indices de productivité. *Ann. Sci. For.* 30 (3) 219-238.
- Dyer, M. E. et R. L. Bailey. 1987. A test of six methods for estimating true heights from stem analysis data. *For. Sci.* 33 :3-13.
- Gagnon, R., 1985. Croissance du sapin baumier en relation avec la durée de sa période initiale d'oppression. Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec, 54 p.
- Gerardin, V., 1977. An integrated approach in the determination of ecological groups in vegetation studies. Thèse de doctorat, Univ. of Connecticut, USA, 237 p.
- Gerardin, V., 1980. L'inventaire du Capital-Nature du territoire de la Baie-James. Les régions écologiques et la végétation des sols minéraux, tome 1. Méthodologie et description, 398 p. et tome 2, annexes, Serv. études écologiques régionales, Min. Environ., Québec.
- Grondin P., J. Laroche, P. Tardif et J. P. Saucier. 1993. Utilisation des modèles de croissances dans la définition des stations forestières. Les modèles de croissance et leurs utilisations, Ung. C. H. éd., Service canadien des forêts, Québec, 204-218.
- Grondin, P., Noël, J ,et S. Bédard, 1995a. Classification écologique préliminaire du sous-domaine de l'Est de la sapinière à bouleaux jaunes. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. 61 p.
- Grondin, P., S. Bédard. et P. Dorais., 1995b. Classification écologique abrégée du sous-domaine de l'Est de la sapinière à bouleau jaune. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, 31 p.

- Hart, A. C. 1965. Red spruce (*Picea rubens* Sarg.) *Dans* : Silvics of forest trees of the United States. H. A. Fowells, comp. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 271. Washington, DC, 305-310
- Heger, L. 1968. A method of constructing site index curves from stem analyses. *Forestry Chronicle*. 44 (4) : 11-15.
- Hills, M. O., 1979b. Twinspan. A Fortran program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes. Cornell University Ithaca, N.Y., 90 p.
- Ker, M. F., et C. Bowling 1991. Polymorphic site index equations for four New Brunswick softwood species. *Can. J. For. Res.* 21 :728-732
- Lapointe, C., 1995. Tests statistiques pour la comparaison de courbes d'analyse de données indépendantes et de mesures répétées. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Rapport interne, 8 p.
- Lachance, D. C. Monnier, J.-P. Bérubé et R. Paquet. 1990. Insectes et maladies des forêts dans la région du Bas-Saint-Laurent/Gaspésie de 1936 à 1987. Forêt Canada, Région du Québec. Rapport d'information LAU-X-93. 223 p.
- Larocque, G., W. J. Parton et D. J. Archibald. 1996. Fonctions polymorphes de productivité de site pour l'épinette noire selon divers types écologiques. *Serv. Can. For., CFL, Rap. Inf. LAU-X-119F*, 17 p.
- Lindstrom, M. J. et D. M. Bates. 1990. Nonlinear mixed effects models for repeated measures data. *Biometrics*. 46 : 673-687
- Littel, R. C., Milliken, G. A., Stroup, W. W. et R. D. Wolfinger. 1996. SAS System for Mixed Models. SAS Institute Inc., Cary, NC. 633 p.
- Lortie, M. 1979. Arbres, forêts et perturbations naturelles au Québec. Les presses de l'Université Laval, Québec, 172 p.
- MacLean, D. A. 1985. Effects of spruce budworm outbreaks on forest growth and yield. *Dans* :Recent Advances in Spruce Budworm Research. Proceedings of the CANUSA Spruce Budworm Research Symposium, 16-20 Septembre, 1984, Bangor, Maine. Éditeurs :Sanders, C. J., R. W. Stark, E. J. Mullins et J. Murphy. Service canadien des forêts, Ottawa, Ont., 148-175.
- Monserud, R. A. 1984. Height growth and site index curves for inland Douglas fir based on stem analysis data and forest habitat type. *For. Sci.* 30, 943-965
- Monserud, R. A. 1987. Variation on a theme of site index. IUFRO Forest Growth Modeling and Prediction Conference, Éditeurs :Ek, A. R., Shiffley, S. R. et T. E. Burk, USDA, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, Minneapolis, Minnesota, 419-427.
- Morris, R. F. , 1948. How old is a balsam fir ? *For. Chron.* 24 : 106-110.

- Ministère des Ressources naturelles. 1994. Une stratégie : Aménager pour mieux protéger les forêts. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Québec, 197 p.
- Ministère des Ressources naturelles. 1996b. Programme de connaissance des écosystèmes forestiers du Québec méridional : objectifs et méthodes de classification de la végétation. Direction de la gestion des stocks forestiers, Ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec, Québec, 11 p.
- Neter, J. et W. Wasserman, 1974. Applied Linear Statistical Models. Regression, Analysis of Variance, and Experimental Designs. Irwin, ed., Homewood, Illinois, 842 p.
- Page, G. 1976. Quantitative evaluation of site potential for spruce and fir in Newfoundland. For. Sci. 22 : 131-143.
- Robitaille, A. et M. Allard, 1996. Guide pratique d'identification des dépôts de surface au Québec. Les publications du Québec, Québec, 109 p.
- Richards, F.J., 1959. A flexible growth function for empirical use. J. Exp. Bot. 10 : 290-300.
- Riopel, M. 1998. Potentiel de croissance de la haute régénération pré-établie de sapin baumier : une analyse dendrométrique au niveau de la tige et du peuplement. Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec, (en rédaction).
- Rondeux, J. 1993. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Presses agronomiques de Gembloux, Gembloux Belgique, 521 p.
- SAS Institute Inc., 1988. SAS/STAT User's Guide, Release 6.03 Edition. Cary, NC, 1028 p.
- Saucier, J.-P. J.-P. Berger H. D'Avignon et P. Racine. 1994. Le point d'observation écologique. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la gestion des stocks forestiers, Service des inventaires forestiers. 116 p.
- Saucier, J.-P. 1992. Croissance et rendement en fonction des types écologiques photo-interprétés de la région écologique 5a-Basses et moyennes Appalaches. Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec, 189 p.
- Saucier, J.-P. 1993. Proposition d'unités homogènes en vue d'établir des tables de rendement : les stations forestières. Les modèles de croissance et leurs utilisations, Ung, C. H. éd., Service canadien des forêts, Québec, 192-203.
- Saucier, J.-P., 1991. Estimation de l'indice de qualité de station en fonction des types écologiques de la région 5a, Basses et moyennes Appalaches. Rapport préliminaire. Non publié, 7 p.
- Saucier, J.-P., et A. Robitaille, 1995. Les unités et les aires écopysiographiques (version préliminaire) Ministère des Ressources naturelles, Direction de la gestion des stocks forestiers.

- Saucier, J.-P. et P. Grondin, 1996. Chapitre 3. Écologie forestière, section 2D. Domaine de la sapinière à bouleau jaune. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, Les Presses de l'Université Laval, Québec, 197-208.
- Saucier, J.-P. J.-F., Bergeron, P. Grondin et A. Robiraille. 1998. Les régions écologiques du Québec méridional (3<sup>e</sup> version) : un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles du Québec. Supplément de l'Aubelle, no. 124, 12 p.
- Schmidt, M. G. et W. H. Carmean. 1988. Jack pine site quality in relation to soil and topography on north central Ontario. *Can. J. For. Res.* 18 :297-305.
- Spurr, S. H. et B. V. Barnes, 1980. *Forest ecology*. 3<sup>e</sup> édition, John Wiley & Sons, New York. 571 p.
- Thibault, M. 1985. Les régions écologiques du Québec méridional : Deuxième approximation. Service de la cartographie et Service de la recherche, MER. Carte 1 : 1 250 000.
- Tremblay, S. 1996. Productivité de sapinières boréales de seconde venue en relation avec les caractéristiques stationnelles. Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec, 139 p.
- Wang, G.G. et K. Klika, 1995. Site-specific height curves for white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) stands based on stem analysis and site classification. *Ann. Sci. For.* 52 : 607-616
- Wykoff, W. R. et R. A. Monserud. 1987. Presenting site quality in increment models : a comparison of methods. *Dans* : Forest growth modelling and prediction. Vol. 1, USDA For. Serv. , North Central For. Exp. Stn, Saint Paul, MN, Gen. Tech. Rep. NC-120, 184-191.
- Vicary, B. P., T. B. Brann et R. H. Griffin. 1984. Base-age invariant polymorphic site index curves for even-aged spruce-fir stands in Maine. Experiment Station Bulletin 802, Maine Agricultural Experiment Station, University of Maine, Orono, Maine, 33 p.
- Vonesh, E.F. et R. L. Carter. 1992. Mixed effects nonlinear regression for unbalanced repeated measures. *Biometrics*. 48 : 1-17.
- Zarnovican, R. 1992. Croissance en hauteur de l'épinette noire : région de Lebel-sur-Quévillon et de Dolbeau au Québec. *Can. J. For. Res.* 22 : 1378-1386.
- Zarnovican, R., D. Ouellette et S. Gendron, 1992. Manuel d'utilisation et références techniques, Logiciel pour analyse de tiges, version 1.0, Forêt Canada, 11 p.
- Zarnovican, R., 1983. Production stationnelle dans les sapinières en Gaspésie. Service canadien des forêts, Centre de recherches forestières des Laurentides. Rapports d'information LAU-X-64, 47 p.
- Zarnovican, R., 1981. À propos de l'âge du sapin baumier et de sa détermination. *Journal canadien de la recherche forestière*. Volume 11, numéro 4, pp. 805-811.

Zeide, B. 1993. Analysis of growth equations. *For. Sci.* 39 (3) : 594-616.

Zelazny, V. F., T. Ng, M. G. Hayner, C. L. Bowling, et D. A. Bewick. 1989. Field guide to forest site classification in New Brunswick. Departement of Natural Resources and Energy, Timber Management Branch, Fredericton, 43 p.

### Annexe A. Description des codes des dépôts de surface utilisés

Code	Type de dépôts et épaisseur
R	Dépôt très mince ou absent
R1A	Till indifférencié allant de mince à très mince (< 50 cm)
M1A	Till indifférencié très mince (< 25 cm)
1AM	Till indifférencié mince (25 cm à 50 cm)
1AY	Till indifférencié mince d'épaisseur moyenne (50 cm à 1 m)
1A	Till indifférencié épais (> 1m)
1AD	Till délavé
2BE	Dépôt d'épandage
3AN	Dépôt fluviatile ancien
7E	Dépôt organique épais (> 1 m)
7T	Dépôt organique mince (< 1 m)

**Annexe B. Classes de drainage utilisées**

<b>Code</b>	<b>Classe de drainage</b>
0	Drainage excessif
1	Drainage rapide
2	Drainage bon
3	Drainage modéré
4	Drainage imparfait
5	Mauvais drainage
6	Drainage très mauvais