

Mémoire de recherche forestière n° 121

Modélisation du rendement et de la production des bétulaies jaunes à résineux

par J.-P. CARPENTIER



JEAN-PIERRE CARPENTIER est bachelier en foresterie de l'Université Laval depuis 1968. Du Service de la restauration, il est passé en 1985 au Service de la recherche appliquée, à titre de chargé de recherches en rendement des forêts. En 1987, l'Université Laval lui a décerné le diplôme de Maître ès sciences en sylviculture et aménagement et en 1995, le titre de *Philosophiae Doctor*.



Depuis de nombreuses années, chacun des Mémoires et des autres rapports publiés par la Recherche forestière est révisé par un comité *ad hoc* d'au moins trois membres recrutés aussi bien à l'intérieur du Ministère que dans le milieu universitaire, la fonction publique du Canada ou les autres milieux de la recherche. Les responsables de la Recherche forestière remercient les scientifiques qui ont accepté bénévolement de revoir le texte présenté ici et de participer ainsi à la diffusion des résultats des recherches menées au Ministère de Ressources naturelles.

Les publications de la Recherche forestière sont produites et diffusées à même les budgets de recherche, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation de chaque projet ou expérience. Ces documents sont donc, par définition, à *tirage limité* et à *diffusion restreinte*. Adresser toute demande comme suit :

Publications
Direction de la recherche forestière
Ministère des Ressources naturelles du Québec
2700, rue Einstein
SAINTE-FOY (Québec)
Canada G1P 3W8

**Modélisation du rendement et de la production
des bétulaies jaunes à résineux**

*À mon père qui pouvait prévoir l'évolution et la croissance
des peuplements forestiers sans l'aide d'outils mathéma-
tiques et informatiques comme celui-ci.*

Ton fils

Modélisation du rendement et de la production des bétulaies jaunes à résineux

par

Jean-Pierre CARPENTIER, ing.f., *Ph.D.*
Service de la recherche appliquée

Mémoire de recherche forestière n° 121

Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles
Direction de la recherche forestière
1996

Ce texte constitue un rapport partiel du projet de recherche 0901-1140 : « Modélisation de la croissance et du rendement des peuplements forestiers. »

ISBN 2-550-30232-X

ISSN 1183-3912

Dépôt légal 1996

Bibliothèque nationale du Québec

Bibliothèque nationale du Canada

© 1995 Jean-Pierre Carpentier

© 1996 Gouvernement du Québec

Remerciements

Cette recherche a été réalisée grâce à la participation financière du ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN) et à l'implication pédagogique de la Faculté de foresterie et de géomatique de l'Université Laval. Les résultats obtenus seront particulièrement utiles au MRN et s'intégreront dans le cadre de sa mission d'aménagement rationnel des forêts du Québec.

En premier lieu, je tiens à remercier les membres du jury, qui ont accepté d'examiner, de commenter et de juger le contenu de ce travail de recherche :

- M. Guy Larocque, chercheur scientifique en dynamique des peuplements forestiers et modélisation à l'Institut forestier national de Petawawa.
- M. Jean Bégin, professeur à la Faculté de foresterie et de géomatique.
- M. Gilles Désaulniers, mathématicien et chercheur scientifique, qui a agi comme prélecteur puis comme membre du jury.
- M. Yvon Richard, responsable de la Division de la biométrie et de l'informatique au Service des laboratoires du ministère des Ressources naturelles du Québec, qui, à titre de co-directeur de thèse, a été un lecteur attentif et perspicace. Sa sagacité et ses conseils ont été précieux.

En second lieu, j'ajoute ma reconnaissance aux personnes suivantes :

- Messieurs Jacques Trecia, Guy Prigent, Jocelyn Boily et Michel Villeneuve qui ont lu attentivement ce manuscrit et y ont suggéré des améliorations.
- M. Sylvain Bernier, statisticien occasionnel au Service de la recherche appliquée, qui a lu et commenté rigoureusement le premier jet de ce manuscrit. J'ai apprécié autant sa rigueur scientifique que son esprit de collaboration et son amitié.

- M. Patrice Tardif, mathématicien au Service des laboratoires, qui a fourni des utilitaires informatiques pour améliorer la rapidité de production du tableau 6.3.
- M. Louis Lacombe, technicien en informatique au même service, qui, grâce à ses connaissances en traitement des bases de données, a incorporé des informations dendrométriques supplémentaires à celles provenant du Service des inventaires forestiers. Il a également produit l'extraction des données brutes pertinentes à la bétulaie jaune à résineux.
- M. Éric Daigle, technicien forestier, qui, par son travail méthodique, m'a permis de pousser plus loin ce travail de recherche.
- Tous les étudiants, qui, au cours des cinq dernières années, ont contribué avec acharnement et compétence à la récolte des données dendrométriques de base.
- Madame Mariette Fournier, agente de secrétariat à la Direction de la recherche forestière, pour son travail de frappe méticuleux et pour la patience dont elle a fait preuve dans la réalisation matérielle du manuscrit.
- Ma famille et mes amis, qui ont accepté mes longs silences et mes absences.

J'exprime finalement ma gratitude à M. Jacques Bélanger, professeur à la Faculté de foresterie et de géomatique, qui, à titre de directeur de thèse, m'a accordé son appui moral et scientifique. Sans son aide et sa bienveillante supervision, ce travail n'en serait point rendu à ce stade de développement.

Avis au lecteur

Il faut remarquer que dans les tableaux préparés en langage *APL PLUS III* pour *WINDOWS*, la fraction décimale est séparée des entiers par un point et l'accent grave n'est pas visible à l'impression. En plus de cet inconvénient, dans le cas des figures conçues au moyen du logiciel *STATGRAPHICS PLUS 6.1*, aucun accent n'est disponible.

Résumé

L'utilisation rationnelle des forêts repose sur la connaissance de l'état actuel des peuplements forestiers. Elle nécessite également l'acquisition d'outils fiables et robustes pour prédire le rendement. Dans le cas des peuplements purs et équiennes, des tables de production sont disponibles dans les pays forestiers. Pour les peuplements mélangés toutefois, très peu de travaux de recherche ont jusqu'à maintenant été publiés. L'objectif de ce projet est la conception d'un logiciel original destiné à simuler la croissance et le rendement des bétulaies jaunes à résineux. Ce logiciel rend compte de la dynamique des essences et de la concurrence entre les individus. On y trouve des équations particulières à chaque essence pour prédire l'évolution des peuplements. Une analyse des divers phénomènes de dynamique des populations est réalisée à partir des données des placettes-échantillons permanentes du ministère des Ressources naturelles du Québec. Le premier phénomène analysé est le recrutement. Les variables explicatives servant à estimer le nombre de recrues réfèrent à la densité globale, à l'importance d'une essence donnée et au niveau d'évolution reflété par la surface terrière et les diamètres moyens quadratiques. Pour le deuxième phénomène, la mortalité, on estime le nombre de tiges mortes par essence et par classe de DHP en fonction du nombre de tiges vivantes et des taux de mortalité prédits à partir des classes de DHP. Pour le troisième phénomène, l'accroissement des survivants, on utilise des données individuelles pour estimer les coefficients des équations de prédiction. Les régresseurs utilisés sont de deux ordres. Au niveau « arbre individuel », le DHP, la surface terrière des plus grosses tiges et le quotient du DHP sur le DHP moyen sont utilisés; au niveau « peuplement entier », les variables sont la surface terrière et le DHP moyen. Nous avons mis au point le logiciel *BOJRES* à partir d'un assemblage logique de ce système d'équations de base et d'un ensemble d'équations auxiliaires de calcul et d'estimation. Il fonctionne de manière interactive et utilise comme intrants une liste d'arbres ou encore une table de peuplement et la hauteur dominante. En dépit du fait que nous n'avions pas de données indépendantes pour procéder à la validation de la robustesse du simulateur, nous estimons que les résultats obtenus sont précis pour des prédictions à court terme et plausibles pour des prédictions à long terme: en nous servant des données initiales comme intrants, nous avons obtenu des extrants assez semblables aux données qu'on observe en mesure finale.

Mots-clés : modèle de croissance et de rendement, modélisation, bouleau jaune, *Betula alleghaniensis*, peuplement mélangé.

Abstract

Modelling growth and yield of mixed species (yellow birch and conifers) stands. *The rational use of forests relies upon knowing the actual state of forest stands. It also requires reliable and robust tools to predict growth and yield. In countries where yield tables are available they exist principally for pure and even-aged stands. For mixed stands very little information has been published. This project was aimed at developing original software to simulate growth and yield of mixed stands composed of yellow birch and various conifer species. It takes into account the dynamics of species and competition between individual trees. It uses specific equations that predict the evolution of stands. The analysis of population dynamics phenomena was based on data collected from Québec's Ministère des Ressources naturelles permanent sample plots. The first phenomenon analysed was recruitment. The variables used to predict the number of ingrowths refer to global density, the importance of a given species, and the degree of evolution estimated by basal area and mean quadratic diameters. For the second phenomenon, mortality, the number of dead stems is estimated for each species and DBH class as a function of the number of live stems at the beginning of the period, and of mortality rates predicted from DBH classes. For the third phenomenon, individual growth of survivors is used to estimate the prediction equation coefficients. Regressors used are of two orders. At the "individual tree" level, DBH, basal area of the largest trees, and the ratio of individual stem DBH over mean DBH for all species are used. At the "whole stand" level the variables used are basal area and mean DBH. The BOJRES software was developed from a logical assemblage of this basic equation system with a group of auxiliary computing and estimating equations. The latter operates in an interactive manner and uses as input a tree list or a stand table and the average height of dominant trees. Despite the fact that no independent data were available to validate the robustness of BOJRES, we believe that our results are precise for short term predictions and plausible for long term predictions. Using initial data as input, we obtained output quite similar to data observed at final measurement.*

Key words : growth and yield, modelling, yellow birch, *Betula alleghaniensis*, mixed stand.

Table des matières

Remerciements	v
Avis au lecteur	vi
Résumé	vii
<i>Abstract</i>	vii
Liste des tableaux	xiii
Liste des figures	xxi
Introduction	1

Chapitre premier

Généralités et historique de la modélisation de la croissance forestière	3
1.1 Généralités et définitions	3
1.1.1 Généralités	3
1.1.2 Définitions	4
1.1.2.1 Modélisation	4
1.1.2.2 Accroissement et production	4
1.1.3 Peuplements forestiers homogènes et hétérogènes	5
1.2 Revue de littérature sur les modèles de prédiction	6
1.2.1 Évolution des méthodes	6
1.2.1.1 Tables de production	6
1.2.2 Conception et typologie des modèles de croissance	8

1.2.2.1	Modèles de peuplement entier	8	2.3.4	Forme et dimensions des placettes	29
1.2.2.2	Modèles de peuplement entier avec distribution diamétrale	9	2.3.5	Composition en essences des placettes	29
1.2.2.3	Modèles « arbre individuel »	10	2.3.6	Principales statistiques concernant les arbres des placettes-échantillons	29
1.2.2.4	Modèles « arbre individuel » indépendants de la distance	11	2.3.7	Étude de la structure d'âge	32
1.2.2.5	Modèles « arbre individuel » dépendants de la distance	11	2.3.8	Étude de la stabilité temporelle du mélange feuillus-résineux	35
1.2.3	Fonctions et équations de prédiction	11	2.4	Détermination de l'amplitude et du nombre de classes de DHP	39
1.3	Autres modèles de prédiction	14	2.4.1	Méthode de projection de tables de peuplement	43
1.3.1	Modèles de succession	14	2.4.2	Innovations apportées à la méthode	43
1.3.2	Modèles architecturaux	14	2.4.3	Phénomènes analysés	46
1.3.3	Modèles globaux ou modèles de gestion	14	2.4.4	Détermination de la longueur des périodes de croissance	46
1.4	Conclusion de la revue de littérature	15	2.4.5	Détermination d'un indice de densité	47
Chapitre deux			2.4.6	Détermination de la variable surface terrière supérieure, pour toutes les essences confondues	50
	Matériel et méthode	17	2.4.7	Détermination de la variable (RDHP)	53
2.1	Spécification du champ d'application	17	Chapitre trois		
2.1.1	Type de couvert	17		Cubage individuel des arbres	55
2.1.2	Groupement d'essences	17	3.1	Spécification des relations « hauteur-DHP »	55
2.1.3	Perturbations sylvicoles non étudiées	17	3.1.1	Multispécifique et multi stade évolutif	55
2.2	Sommaire des caractéristiques écologiques du territoire étudié	23	3.1.2	Multispécifique et mono stade évolutif	55
2.2.1	Domaine de l'érablière à bouleau jaune	23	3.1.3	Monospécifique et multi stade évolutif	56
2.2.2	Domaine de la sapinière à bouleau jaune	23	3.1.4	Monospécifique et mono stade évolutif	56
2.2.3	Stabilité des peuplements	25	3.1.5	Modèle global ou local	56
2.3	Placettes-échantillons permanentes, provenance et caractéristiques	25	3.1.6	Modèle local « essence - placette - instantané »	56
2.3.1	Situation initiale	25	3.2	Estimation de la hauteur individuelle au moyen d'un modèle de régression linéaire	57
2.3.2	Réseau des placettes-échantillons permanentes	25			
2.3.3	Localisation des placettes-échantillons permanentes retenues	25			

3.3 Estimation de la hauteur individuelle au moyen d'un modèle de régression non linéaire	57	Chapitre cinq	
3.4 Comparaison entre les modèles linéaires et non linéaires	57	Phénomène de la mortalité	125
3.5 Estimation de la hauteur dominante lorsqu'elle n'est pas mesurée sur le terrain	74	5.1 Types de mortalité	125
3.6 Modélisation de la hauteur individuelle à partir de deux variables explicatives	76	5.1.1 Mortalité irrégulière	126
3.7 Impact de la hauteur dominante dans l'estimation des hauteurs individuelles	82	5.1.2 Mortalité régulière	126
3.7.1 Comportement de la hauteur individuelle en fonction du DHP individuel et de la hauteur dominante fixée à 20 mètres	82	5.2 Considérations relatives à la mortalité dans la littérature	126
3.8 Prédiction du volume marchand brut individuel	95	5.2.1 Importance de la mortalité et mécanismes de régénération	127
3.9 Prédiction du volume marchand brut de la placette en se basant sur la surface terrière marchande et la hauteur dominante	95	5.2.2 Mortalité chez les vétérans	127
3.9.1 Estimation du rapport « VMB/STM »	99	5.2.3 Sources de la mortalité	127
Chapitre quatre		5.2.4 Modèles de mortalité dépendants et indépendants de la distance entre les individus	128
Phénomène du recrutement	105	5.3 Nombre de tiges mortes par placette et par essence durant la période de croissance 1-2	128
4.1 Place occupée par les recrues dans la modélisation	105	5.3.1 Illustration par essence et par période d'observation	128
4.1.1 Définition du phénomène du recrutement	105	5.3.2 Quantification de la mortalité par classe de DHP et par essence	136
4.1.2 Travaux antérieurs sur le phénomène du recrutement	105	5.4 Détermination du taux de mortalité à partir des données de base	136
4.2 Détermination des taux de recrutement observés dans les placettes permanentes	107	5.4.1 Compilation par classe de DHP et par groupe d'essences	136
4.3 Prédiction du nombre de tiges recrues par essence et par placette	114	5.4.2 Taux de mortalité par période et pour toutes les essences confondues	137
4.4 Désavantage à l'utilisation de la régression linéaire multiple	117	5.4.3 Taux de mortalité par période et par essence	137
4.5 Avantage à l'utilisation de la pondération	117	5.5 Estimation des coefficients de régression pour la prédiction des taux de mortalité	137
		5.5.1 Inférences statistiques sur les régressions de mortalité par essence	138
		5.6 Résultats des régressions servant au lissage des taux par essence et par classe de DHP	146

Chapitre six		6.5.2 Transformation d'un accroissement en surface terrière vers un facteur de mouvement	190
Phénomène de l'accroissement	151	6.5.3 Ordinogramme de logiciel <i>BOJRES</i>	190
6.1 Croissance des arbres individuels en diamètre et en surface terrière	151	Chapitre sept	
6.2 Procédure de modélisation de la croissance diamétrale en deux étapes	152	Résultats et validation	193
6.2.1 Détermination de la croissance potentielle	152	7.1 Description du simulateur <i>BOJRES</i>	193
6.2.2 Détermination d'une fonction modificatrice	152	7.2 Résultats des simulations	193
6.2.3 Structure de la variable dépendante du module de croissance	152	7.2.1 Prédications à court terme	193
6.3 L'accroissement diamétral annuel moyen et ses variables explicatives	153	7.2.2 Prédications à long terme	194
6.3.1 Variables potentielles pour prédire l'accroissement individuel	153	7.3 Matrices des tiges par classe de DHP et par essence	221
6.3.2 Compilation de l'accroissement diamétral par essence pour trois périodes de croissance	155	7.3.1 Imprécision engendrée par l'élaboration de tables de peuplement entre le temps 1 et le temps 2	221
6.3.3 Régression de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale	155	7.3.2 Biais par essence pour l'ensemble des placettes.	224
6.3.4 Vérification de l'équation de prédiction de l'accroissement en fonction du DHP	156	7.4 Validation du logiciel de prédiction <i>BOJRES</i>	224
6.3.5 Comparaison de l'accroissement diamétral pour les deux essences principales	173	7.4.1 Caractérisation de la situation à traiter	226
6.3.6 Comparaison entre les accroissements prédits par la fonction <i>CAC</i> et les accroissements estimés par Fortin	174	7.4.2 Calcul de la précision au moyen d'erreurs critiques	227
6.3.7 Accroissements quinquennaux en diamètre par la fonction <i>CAC</i>	178	7.4.3 Détermination de l'intervalle de confiance de l'erreur probable	227
6.4 Traduction de l'accroissement diamétral en facteur de mouvement	178	7.4.4 Intervalle de confiance pour une prédiction unique	227
6.4.1 Facteur de mouvement résultant de l'équation d'accroissement diamétral <i>CAC</i>	179	7.4.5 Intervalle de tolérance pour un grand nombre de prédictions	229
6.5 Accroissement en surface terrière	179	7.5 Inférences statistiques concernant la précision des prédictions	229
6.5.1 Facteurs de mouvement résultant de l'équation d'accroissement en surface terrière <i>CAST</i>	185	7.6 Statistiques de validation du système <i>BOJRES</i> pour l'écart du volume marchand brut	229
		Conclusion générale	233
		Bibliographie	237

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Superficie (km ²) des groupements d'essences pour les peuplements jeunes et mûrs des forêts publiques	21
Tableau 2.2	Caractéristiques climatiques des régions écologiques du Québec méridional	22
Tableau 2.3	Classification écologique du domaine de l'érablière à bouleau jaune	24
Tableau 2.4	Classification écologique du domaine de la sapinière à bouleau jaune	26
Tableau 2.5	Répartition écologique de la superficie forestière du Québec méridional	27
Tableau 2.6	Intensité d'échantillonnage pour chaque région forestière	29
Tableau 2.7	Identification des 24 essences retrouvées dans les 101 placettes	33
Tableau 2.8	Répartition de l'effectif total en nombre de tiges entre les différentes essences, toutes placettes et toutes mesures confondues	34
Tableau 2.9	Principales statistiques individuelles pour les 101 placettes, toutes essences confondues	34
Tableau 2.10	Description dendrométrique de la placette « Laurier »	35
Tableau 2.11	Caractéristiques dendrométriques des arbres de la placette « Laurier »	35

Tableau 2.12	Évolution de la surface terrière marchande de la cohorte feuillue, en mètres carrés par placette	40	Tableau 3.5	Coefficients des régressions pour l'estimation de la hauteur dominante	75
Tableau 2.13	Évolution de la surface terrière marchande de la cohorte résineuse, en mètres carrés par placette	41	Tableau 3.6	Tables d'analyse de la variance des régressions pour l'estimation de la hauteur dominante	81
Tableau 2.14	Importance de la surface terrière marchande de la cohorte feuillue en pourcentage par rapport à la surface terrière, toutes essences confondues	42	Tableau 3.7	Impact sur les résidus, occasionné par l'introduction de la hauteur dominante (HDO) dans la relation « Hauteur-DHP »	82
Tableau 2.15	Durée en années des périodes de croissance	48	Tableau 3.8	Coefficients des régressions non linéaires pour l'estimation de la hauteur en fonction du DHP et de la hauteur dominante	87
Tableau 2.16	Coefficients de la régression non linéaire pour l'estimation du nombre de tiges marchandes en fonction du DHP marchand moyen	50	Tableau 3.9	Tables d'analyse de la variance des régressions non linéaires pour l'estimation de la hauteur en fonction de DHP et de la hauteur dominante	88
Tableau 2.17	Table d'analyse de la variance pour la régression non linéaire pour l'estimation du nombre de tiges marchandes en fonction du DHP marchand moyen	50	Tableau 3.10	Matrice PHHDODHPPERRON des coefficients pour le calcul de la hauteur de chaque tige en utilisant la fonction <i>HHDODHP</i>	94
Tableau 2.18	Détermination de la surface terrière supérieure (STS) à une classe donnée de DHP dans le cas d'une distribution des tiges par classe de DHP	52	Tableau 3.11	Matrice COEFPERRON33 des coefficients pour le calcul du volume marchand brut de chaque tige en utilisant la fonction <i>VMBPERRON</i>	96
Tableau 3.1	Coefficients des régressions linéaires pour l'estimation de la hauteur en fonction du DHP	58	Tableau 3.12	Statistiques relatives à la détermination du volume marchand brut individuel pour toutes les essences à la mesure 1	97
Tableau 3.2	Tables d'analyse de la variance pour les régressions linéaires pour l'estimation de la hauteur en fonction de DHP	59	Tableau 3.13	Statistiques relatives à la détermination du volume marchand brut par placette, pour toutes les essences à la mesure 1	98
Tableau 3.3	Coefficients des régressions non linéaires pour l'estimation de la hauteur en fonction du DHP	65	Tableau 3.14	Coefficients de la régression non linéaire pour l'estimation du volume marchand brut en fonction de la hauteur dominante et de la surface terrière marchande	99
Tableau 3.4	Tables d'analyse de la variance pour les régressions non linéaires pour l'estimation de la hauteur en fonction de DHP	66	Tableau 3.15	Table d'analyse de la variance pour la régression non linéaire du volume marchand brut en fonction de la hauteur dominante et de la surface terrière marchande	99

Tableau 3.16	Abaque du volume marchand brut (VMB) en mètres cubes par hectare en fonction de la hauteur dominante en mètres et de la surface terrière marchande en mètres carrés pour la bétulaie jaune à résineux	100	Tableau 4.9	Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence THO	111
Tableau 3.17	Rapport du volume marchand brut sur la surface terrière marchande (VMB/STM) en fonction de la hauteur dominante pour la bétulaie jaune à résineux	104	Tableau 4.10	Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence PRU	111
Tableau 4.1	Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence BOJ	106	Tableau 4.11	Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour les essences résineuses	112
Tableau 4.2	Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence BOP	106	Tableau 4.12	Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour les essences feuillues	112
Tableau 4.3	Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence ERS	108	Tableau 4.13	Détermination du taux de recrutement décennal par période de croissance et par essence	114
Tableau 4.4	Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence ERR	108	Tableau 4.14	Matrice des variables impliquées dans la régression du recrutement pour l'essence BOJ	116
Tableau 4.5	Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence PRP	109	Tableau 4.15	Coefficients des équations d'estimation du recrutement pour les essences feuillues	118
Tableau 4.6	Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence SAB	109	Tableau 4.16	Tables d'analyse de la variance pour les régressions d'estimation du recrutement annuel pour les essences feuillues	119
Tableau 4.7	Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence EPB	110	Tableau 4.17	Coefficients des équations d'estimation du recrutement des essences résineuses	120
Tableau 4.8	Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence EPR	110	Tableau 4.18	Tables d'analyse de la variance pour les régressions d'estimation du recrutement annuel pour les essences résineuses	121
			Tableau 4.19	Matrice des coefficients affectant les deux familles de variables de l'équation de prédiction du nombre de tiges recrutées pour chacune des essences	122

Tableau 4.20	Biais dans les prédictions du nombre de recrues calculé dans les 101 placettes conséquemment à l'utilisation d'une régression linéaire non pondérée	124	Tableau 5.12	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour les essences résineuses	134
Tableau 4.21	Biais dans les prédictions du nombre de recrues calculé dans les 101 placettes conséquemment à l'utilisation d'une régression linéaire pondérée	124	Tableau 5.13	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour les essences feuillues	134
Tableau 5.1	Nombre de tiges mortes observé par essence et par placette pour la période de croissance 1-2	129	Tableau 5.14	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour les essences feuillues et résineuses	135
Tableau 5.2	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour l'essence BOJ	131	Tableau 5.15	Taux de mortalité (TMD) pour chacune des essences feuillues et résineuses, toutes classes de DHP confondues	135
Tableau 5.3	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour l'essence BOP	131	Tableau 5.16	Détermination du nombre de tiges mortes par essence sur une base décennale pour la période 1-2 et pour toutes les placettes	135
Tableau 5.4	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour l'essence ERS	131	Tableau 5.17	Coefficients des régressions linéaires d'estimation de la mortalité pour les essences feuillues	139
Tableau 5.5	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour l'essence ERR	132	Tableau 5.18	Tables d'analyse de la variance pour les régressions d'estimation de la mortalité pour les essences feuillues	140
Tableau 5.6	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour l'essence PRP	132	Tableau 5.19	Coefficients des régressions linéaires d'estimation de la mortalité pour les essences résineuses	141
Tableau 5.7	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour l'essence SAB	132	Tableau 5.20	Tables d'analyse de la variance pour les régressions d'estimation de la mortalité pour les essences résineuses	142
Tableau 5.8	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour l'essence EPB	132	Tableau 5.21	Prédiction des taux décennaux de mortalité par classe de DHP et par essence	145
Tableau 5.9	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour l'essence EPR	132	Tableau 5.22	Vérification des prédictions de la mortalité par essence et par période de croissance dans les 101 placettes en utilisant la fonction de régression linéaire MORTDHP	146
Tableau 5.10	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour l'essence THO	132	Tableau 6.1	Variables concernant l'accroissement diamétral sur une base annuelle pour la période 1-2 pour l'essence BOJ	154
Tableau 5.11	Taux de mortalité (TMD) par classe de DHP pour l'essence PRU	134			

Tableau 6.2	Statistiques descriptives de l'accroissement diamétral sur une base annuelle pour les dix essences principales	156	Tableau 6.12	Coefficients des régressions non linéaires pour l'estimation de l'accroissement annuel en surface terrière pour les essences feuillues.	181
Tableau 6.3	Coefficients des régressions non linéaires pour l'accroissement quinquennal en diamètre en fonction du DHP, pour les essences feuillues	159	Tableau 6.13	Tables d'analyse de la variance pour les régressions non linéaires de l'estimation de l'accroissement annuel en surface terrière, pour les essences feuillues	182
Tableau 6.4	Tables d'analyse de la variance pour les régressions non linéaires de l'accroissement quinquennal du diamètre en fonction du DHP, pour les essences feuillues	160	Tableau 6.14	Coefficients des régressions non linéaires pour l'estimation de l'accroissement annuel en surface terrière pour les essences résineuses.	183
Tableau 6.5	Coefficients des régressions non linéaires pour l'accroissement quinquennal du diamètre en fonction du DHP, pour les essences résineuses	161	Tableau 6.15	Tables d'analyse de la variance pour les régressions non linéaires de l'estimation de l'accroissement annuel en surface terrière, pour les essences résineuses.	184
Tableau 6.6	Tables d'analyse de la variance pour les régressions non linéaires de l'accroissement quinquennal du diamètre en fonction du DHP, pour les essences résineuses	162	Tableau 6.16	Coefficients de l'équation générale d'accroissement annuel en surface terrière	185
Tableau 6.7	Sommation en cm des accroissements diamétraux observés et prédits par essence en utilisant la fonction de régression non linéaire CAC	173	Tableau 6.17	Biais des prédictions de l'accroissement en surface terrière par essence en utilisant la fonction de régression non linéaire CAST	186
Tableau 6.8	Accroissements quinquennaux en diamètre calculés (cm) par la fonction CAC par essence et par classe de DHP	174	Tableau 6.18	Facteurs de mouvement des tiges d'une classe de DHP aux classes immédiatement supérieures par essence et par classe de DHP en utilisant la fonction d'accroissement en surface terrière CAST	187
Tableau 6.9	Caractéristiques des accroissements en diamètre engendrés par la fonction CAC	175	Tableau 6.19	Facteurs de mouvement des tiges d'une classe de DHP aux classes supérieures pour les BOJ des 10 premières placettes en utilisant la fonction d'accroissement en surface terrière CAST	188
Tableau 6.10	Facteurs de mouvement des tiges par classe de DHP estimés avec la fonction non linéaire d'accroissement CAC	175	Tableau 6.20	Facteurs de mouvement des tiges d'une classe de DHP aux classes supérieures pour les SAB des 10 premières placettes en utilisant la fonction d'accroissement en surface terrière CAST	189
Tableau 6.11	Accroissement annuel observé en surface terrière (en mètres carrés) par essence et par placette pour la période de croissance 1-2	180			

Tableau 6.21	Transformation d'accroissements en surface terrière par classe de DHP en des facteurs de mouvement	191	Tableau 7.13	Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence TOT	206
Tableau 7.1	Résultats de la projection d'une table de peuplement pour l'essence BOJ et pour la placette numéro 11	194	Tableau 7.14	Résultats des projections des tables de peuplement par essence et pour l'ensemble des placettes	207
Tableau 7.2	Résultats de la projection d'une table de peuplement pour l'essence SAB et pour la placette numéro 11	195	Tableau 7.15	Validation du système de prédiction pour le phénomène de la mortalité pour l'essence BOJ	208
Tableau 7.3	Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence BOJ	196	Tableau 7.16	Validation du système de prédiction pour le phénomène du recrutement pour l'essence BOJ	209
Tableau 7.4	Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence BOP	197	Tableau 7.17	Validation du système de prédiction pour le phénomène de l'accroissement en surface terrière pour l'essence BOJ	210
Tableau 7.5	Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence ERS	198	Tableau 7.18	Validation du système de prédiction pour le phénomène de la mortalité par essence	211
Tableau 7.6	Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence ERR	199	Tableau 7.19	Validation du système de prédiction pour le phénomène du recrutement par essence	211
Tableau 7.7	Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence PRP	200	Tableau 7.20	Validation du système de prédiction pour le phénomène de l'accroissement en surface terrière par essence	211
Tableau 7.8	Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence SAB	201	Tableau 7.21	Résultats de la projection d'une table de peuplement pour l'essence BOJ et pour la placette numéro 11	212
Tableau 7.9	Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence EPB	202	Tableau 7.22	Résultats des projections des tables de peuplement selon les placettes pour l'essence BOJ et pour la placette numéro 11	213
Tableau 7.10	Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence EPR	203	Tableau 7.23	Résultats des projections des tables de peuplement selon les placettes pour l'essence BOP et pour la placette numéro 11	213
Tableau 7.11	Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence THO	204	Tableau 7.24	Résultats des projections des tables de peuplement selon les placettes pour l'essence SAB et pour la placette numéro 11	214
Tableau 7.12	Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence PRU	205			

Tableau 7.25 Résultats des projections des tables de peuplement selon les placettes pour l'essence TOT et pour la placette numéro 11	214	Tableau 7.36 Statistiques de validation du système de prédiction <i>BOJRES</i> en terme d'écarts en volume marchand brut (VMB) en mètres cubes pour l'essence BOJ	231
Tableau 7.26 Distribution du nombre de tiges marchandes par classe de DHP pour l'essence BOJ à la mesure 1	219	Tableau 7.37 Statistiques de validation du système de prédiction <i>BOJRES</i> en terme de normalité des écarts de volume marchand brut (VMB) en mètres cubes pour toutes les essences confondues	232
Tableau 7.27 Distribution du nombre de tiges marchandes par classe de DHP pour l'essence BOJ à la mesure 2	220	Tableau 7.38 Statistiques de validation du système de prédiction <i>BOJRES</i> en terme d'intervalles de volume marchand brut (VMB) en mètres cubes pour toutes les essences confondues	232
Tableau 7.28 Estimation du biais par essence et par placette entre les surfaces terrières calculées selon le DHP exact et selon une distribution par classe de DHP, matrice VOLPLBOJ1	222		
Tableau 7.29 Estimation du biais par essence et par placette entre les surfaces terrières calculées selon le DHP exact et selon une distribution par classe de DHP, matrice VOLPLBOJ2	223		
Tableau 7.30 Erreur maximale engendrée par la distribution en classe de DHP	224		
Tableau 7.31 Erreur en surface terrière engendrée par la distribution en classe de DHP pour la placette n° 1	224		
Tableau 7.32 Estimation du biais par essence entre les surfaces terrières calculées selon le DHP exact et selon une distribution par classe de DHP, pour la mesure 1	225		
Tableau 7.33 Estimation du biais par essence entre les surfaces terrières calculées selon le DHP exact et selon une distribution par classe de DHP, pour la mesure 2	225		
Tableau 7.34 Validation du système de prédiction <i>BOJRES</i> pour le volume marchand brut (VMB) pour l'essence BOJ	228		
Tableau 7.35 Validation du système de prédiction <i>BOJRES</i> pour le volume marchand brut (VMB) par essence et pour l'ensemble des essences	230		

Liste des figures

Figure 1.1	Schéma d'intégration et de synthèse des connaissances au travers de la modélisation, inspiré de Houllier <i>et al.</i> (1991)	12
Figure 2.1	Schéma général des types de couvert et introduction aux groupements d'essences	18
Figure 2.2	Groupements d'essences dans les peuplements mélangés à prédominance résineuse dont la partie feuillue est composée principalement de bouleau jaune	19
Figure 2.3	Groupements d'essences dans les peuplements mélangés à prédominance feuillue dont la partie feuillue est composée principalement de bouleau jaune	20
Figure 2.4	Localisation du domaine écologique de la sapinière à bouleau jaune	28
Figure 2.5	Régions forestières du Québec d'après le Service des inventaires forestiers	30
Figure 2.6	Localisation des placettes-échantillons permanentes concernant la bétulaie jaune à résineux	31
Figure 2.7	Schématisation d'une grappe de placettes permanentes	32
Figure 2.8	Histogramme de fréquence des tiges de la placette « Laurier » par classe de DHP	36

Figure 2.9	Histogramme de fréquence des tiges de la placette « Laurier » par classe de hauteur	37	Figure 3.6	Données de base et ajustement de la régression non linéaire exprimant la hauteur en fonction du DHP pour les bouleaux jaunes	67
Figure 2.10	Histogramme de fréquence des tiges de la placette « Laurier » par classe d'âge	38	Figure 3.7	Données de base et ajustement de la régression non linéaire exprimant la hauteur en fonction du DHP pour les résineux sauf le thuya occidental	68
Figure 2.11	Évolution dans le temps du ratio de la STM de la cohorte feuillue sur la STM toutes essences, pour les neuf premières placettes	44	Figure 3.8	Données de base et ajustement de la régression non linéaire exprimant la hauteur en fonction du DHP pour les thuyas occidentaux	69
Figure 2.12	Évolution dans le temps du ratio de la STM de la cohorte feuillue sur la STM toutes essences, pour les placettes 10 à 18	45	Figure 3.9	Données de base et ajustement de la régression non linéaire exprimant la hauteur en fonction du DHP pour toutes les essences confondues dans les bétulaies jaunes à résineux	70
Figure 2.13	Histogramme de fréquence du nombre de placettes réparties en fonction de la durée de croissance entre les observations 1 et 2	49	Figure 3.10	Comparaison entre les prédictions d'équations non linéaires pour trois groupes différents	71
Figure 2.14	Relation entre le nombre de tiges marchandes par placette et le DHPM	51	Figure 3.11	Comparaison entre la régression linéaire et non linéaire pour estimer la hauteur du bouleau jaune en fonction du DHP	72
Figure 3.1	Données de base et ajustement d'une équation linéaire du second degré exprimant la hauteur en fonction du DHP pour les bouleaux jaunes	60	Figure 3.12	Comparaison entre la régression linéaire et non linéaire pour estimer la hauteur de la cohorte résineuse	73
Figure 3.2	Données de base et ajustement d'une équation linéaire du second degré exprimant la hauteur en fonction du DHP pour les résineux sauf le thuya occidental	61	Figure 3.13	Hauteurs dominantes prédites et observées pour toutes les tiges dominantes et codominantes de bouleau jaune	77
Figure 3.3	Données de base et ajustement d'une équation linéaire du second degré exprimant la hauteur en fonction du DHP pour les thuyas occidentaux	62	Figure 3.14	Hauteurs dominantes prédites et observées pour toutes les tiges dominantes et codominantes de la cohorte résineuse sans le thuya occidental	78
Figure 3.4	Données de base et ajustement d'une équation linéaire de second degré exprimant la hauteur en fonction du DHP, pour toutes les essences confondues dans les bétulaies jaunes à résineux	63	Figure 3.15	Hauteurs dominantes prédites et observées pour toutes les tiges dominantes et codominantes de thuya occidental	79
Figure 3.5	Comparaison entre les équations linéaires pour trois groupes différents	64	Figure 3.16	Hauteurs dominantes prédites et observées pour toutes les tiges dominantes et codominantes, toutes essences confondues	80

Figure 3.17 Hauteurs individuelles observées et prédites en fonction du DHP et de la hauteur dominante pour les bouleaux jaunes	83	Figure 3.27 Volume marchand brut par hectare en fonction de la surface terrière marchande lorsque la hauteur dominante est fixée à quatre niveaux différents	102
Figure 3.18 Hauteurs individuelles observées et prédites en fonction du DHP et de la hauteur dominante pour la cohorte résineuse sans le thuya occidental	84	Figure 3.28 Volume marchand brut par hectare en fonction de la hauteur dominante lorsque la surface terrière marchande est fixée à quatre niveaux différents	103
Figure 3.19 Hauteurs individuelles observées et prédites en fonction du DHP et de la hauteur dominante pour les thuyas occidentaux	85	Figure 4.1 Nombre de recrues observé ou prédit sur une base annuelle pour le bouleau jaune	123
Figure 3.20 Hauteurs individuelles observées et prédites en fonction du DHP et de la hauteur dominante pour toutes les essences confondues	86	Figure 5.1 Taux décennal de mortalité observé et prédit pour le bouleau jaune	143
Figure 3.21 Hauteur en fonction du DHP, lorsque la hauteur dominante est fixée à quatre niveaux différents, pour le bouleau jaune	89	Figure 5.2 Taux décennal de mortalité observé et prédit pour le sapin baumier	144
Figure 3.22 Hauteur en fonction du DHP, lorsque la hauteur dominante est fixée à quatre niveaux différents, pour la cohorte résineuse sans le thuya occidental	90	Figure 5.3 Taux décennaux de mortalité en fonction du DHP pour quatre essences feuillues	147
Figure 3.23 Hauteur en fonction du DHP, lorsque la hauteur dominante est fixée à quatre niveaux différents, pour le thuya occidental	91	Figure 5.4 Taux décennaux de mortalité en fonction du DHP pour cinq essences résineuses	148
Figure 3.24 Hauteur en fonction du DHP, lorsque la hauteur dominante est fixée à quatre niveaux différents, pour toutes les essences confondues	92	Figure 5.5 Taux de mortalité décennaux en fonction du DHP pour deux essences principales	149
Figure 3.25 Hauteur en fonction du DHP, lorsque la hauteur dominante est fixée à 20 mètres, pour trois cohortes différentes	93	Figure 6.1 Polygone de fréquence de la variable dépendante ACCR diamétral annuel pour le bouleau jaune	157
Figure 3.26 Volume marchand brut observé par placette en fonction de la surface terrière marchande et de la hauteur dominante	101	Figure 6.2 Polygone de fréquence de la variable dépendante ACCR diamétral annuel pour le sapin baumier	158
		Figure 6.3 Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges de bouleau jaune	163
		Figure 6.4 Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges de bouleau à papier	164

- Figure 6.5** Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges d'érable à sucre 165
- Figure 6.6** Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges d'érable rouge 166
- Figure 6.7** Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges de cerisier de Pennsylvanie 167
- Figure 6.8** Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges de sapin baumier 168
- Figure 6.9** Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges d'épinette blanche 169
- Figure 6.10** Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges d'épinette rouge 170
- Figure 6.11** Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges de thuya occidental 171
- Figure 6.12** Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges de pruche du Canada 172
- Figure 6.13** Comparaison d'accroissements par classe de DHP pour le bouleau jaune 176
- Figure 6.14** Comparaison d'accroissements par classe de DHP pour le sapin baumier 177
- Figure 6.15** Ordinogramme du logiciel de prédiction *BOJRES* 192
- Figure 7.1** Évolution à long terme du volume marchand brut pour la placette n° 25 215
- Figure 7.2** Évolution à long terme du volume marchand brut pour la placette n° 11 216
- Figure 7.3** Évolution à long terme du volume marchand brut pour la placette n° 4 217
- Figure 7.4** Évolution à long terme du volume marchand brut pour la placette n° 100 218

Introduction

Ce document présente des résultats de recherches portant sur la croissance et le rendement obtenus dans le cadre des activités du Service de la recherche appliquée (SRA) au ministère des Ressources naturelles du Québec. La mission du SRA comprend l'acquisition de connaissances sur les processus de production forestière ainsi que la conception et la diffusion d'outils d'aide à la décision, pour répondre aux besoins exprimés par des experts forestiers du Québec. L'élaboration de modèles dynamiques de croissance, à des fins de prédiction de la production, constitue un auxiliaire précieux pour prendre des décisions en aménagement forestier.

Dans notre cas précis, il s'agit de concevoir un modèle de simulation spécialement adapté pour prédire l'évolution d'un type de peuplement mélangé dont la désignation est : la bétulaie jaune à résineux. Actuellement, il n'existe pas d'outil de prédiction basé sur des observations provenant de ce type de peuplement où interviennent différentes essences. Il existe actuellement 7 898 km² de forêt qui appartiennent à cette désignation au Québec. Ces peuplements ont été exploités jusqu'à maintenant, selon diverses procédures, en fonction des besoins spécifiques en matière ligneuse comblés par les différentes essences. La qualité et les dimensions des tiges ainsi que les contraintes d'exploitation ont été les fils conducteurs des activités passées. Actuellement, la demande en bois de qualité de bouleau jaune, l'espèce par excellence de ces peuplements, n'est plus satisfaite à cause de la rareté de la ressource. Pour les essences résineuses, les besoins sont bien connus, autant pour la production de bois de construction que pour la production de bois destinée à la pâte et au papier. Dans l'avenir, on doit s'attendre à une demande accrue pour les bois feuillus de faible qualité. Ceci provoquera une sylviculture plus intensive en vue de satisfaire une demande grandissante, surtout pour des produits destinés à l'exportation.

Le présent document comprend sept chapitres qui sont déterminés en fonction des grandes étapes que nous avons franchies dans la réalisation du projet de recherche. Dans le premier chapitre, on présente une revue de littérature qui trace un historique de la modélisation forestière dans le monde. On y traite de la classification et des avantages et inconvénients des différentes avenues tracées jusqu'à maintenant. Le chapitre deux, intitulé « Matériel et méthode », est consacré à la description des dispositifs expérimentaux permanents disponibles pour la modélisation de la production forestière. Les données de nature longitudinale sont exploitées dans les chapitres subséquents. Dans le chapitre II, on se limite à montrer l'importance des différentes essences présentes et la localisation des placettes-échantillons permanentes retenues. Le chapitre se termine par la description de la méthode préconisée de projection de tables de peuplement. On y insiste sur l'originalité du mode de conception utilisé, c'est-à-dire l'intégration de l'accroissement du niveau « Arbre » pour l'estimation des paramètres au niveau « classe de DHP » lors de l'élaboration du modèle informatique proposé. Les utilisateurs disposeront ainsi d'un produit conçu finement mais souple d'utilisation, tout en correspondant aux intrants disponibles pour les fins d'aménagement et de planification forestière.

Dans le chapitre trois, on traite de la relation entre la hauteur totale (H) de chacun des individus et leur diamètre à hauteur de poitrine (DHP). Dans ce cas, nous innovons en préconisant, au Québec, l'utilisation d'un modèle de régression non linéaire plutôt que le modèle polynomial du second degré. Par la suite, nous incorporons une variable peuplement, la hauteur dominante (HDO), dans la relation afin de faire le passage mathématique d'une équation générale vers une équation d'utilisation locale. Le chapitre se termine en expliquant les modalités de cubage à l'aide des concepts décrits auparavant et des équations de cubage individuel publiées par Perron (1983).

Les chapitres quatre, cinq et six sont consacrés à l'analyse des phénomènes de croissance qui prennent en considération la dynamique des peuplements forestiers. Les phénomènes recrutement, mortalité et accroissement des survivants sont intégrés dans un système d'équations mathématiques qui cherchent à expliquer au mieux la réalité observée dans les placettes permanentes.

Le chapitre sept est intitulé « Résultats et validation ». Au début, on explique l'initialisation du logiciel, puis comment sont imbriquées les différentes équations de prédiction. Par la suite, nous montrons les différentes tables produites. La deuxième partie du chapitre est consacrée à la validation statistique du modèle. On vérifie comment les prédictions s'ajustent à la réalité observée.

La « Conclusion générale » rappelle les forces et les faiblesses du système de prédiction préconisé et suggère des avenues de recherche pour faire progresser les connaissances en modélisation du rendement et de la production forestière.

Chapitre premier

Généralités et historique de la modélisation de la croissance forestière

1.1 Généralités et définitions

1.1.1 Généralités

En foresterie, la modélisation offre des outils d'aide à la gestion et des instruments privilégiés de recherche : « les modèles de prédiction du rendement des forêts ». Les modèles ne sont pas des lois universelles, mais ils constituent des instruments scientifiques qui cherchent à rendre compte de la réalité. En outre, ils dépendent beaucoup des hypothèses qui les sous-tendent et des objectifs qui sont fixés dans la recherche.

La modélisation de la croissance et du rendement est un domaine important de la recherche forestière. En aménagement forestier, la prédiction du développement de l'arbre ou du peuplement forestier (accroissement en diamètre, en hauteur, en surface terrière et en volume) est une opération essentielle pour le gestionnaire.

Dans plusieurs pays, les autorités publiques s'intéressent au plus haut niveau à la prévision du rendement forestier. Ainsi, dans le mandat du plan stratégique de 1991 statuant sur l'état de la foresterie au Canada, on peut lire :

« Increased capability to predict and prepare for the consequence of human activities and natural disturbances ... Improved growth and yield information as a research priority ... » (LeMay et al. 1992).

L'objectif de la modélisation forestière est de prédire l'évolution de certaines variables dendrométriques. Plusieurs auteurs se sont attardés à la classification des modèles. Alder (1980), Avery et Burkhart (1983) et Rondeux (1993) décrivent quelques modèles courants de croissance forestière. La classification de ces modèles est établie essentiellement à deux niveaux en fonction de l'objet modélisé :

- a) l'arbre : les modèles « arbre individuel » sont ceux qui s'intéressent à la prédiction de l'accroissement d'un arbre quelconque dans un peuplement en fonction de ses caractéristiques propres (essence, diamètre, statut social, ...) et des caractéristiques des arbres qui l'entourent;
- b) le peuplement : les modèles « peuplement entier » permettent de simuler l'évolution des variables globales des peuplements comme la hauteur dominante, le diamètre moyen, la surface terrière moyenne.

Lorsqu'ils souhaitent analyser et simuler la réaction des peuplements soumis à des traitements différents, ayant en plus des compositions multiples, les forestiers ont besoin de trouver des méthodes appropriées. Ces méthodes sont regroupées sous le terme générique de **modélisation**. Cette étude s'intéresse spécialement à la modélisation de la production ligneuse des bétulaies jaunes à résineux. Les modèles se présentent comme des outils capables de fournir aux utilisateurs des résultats qui correspondent aux besoins réels. L'utilisation des modèles est justifiée par la complexité des problèmes rencontrés dans la nature.

La revue bibliographique présentée dans ce document est essentiellement consacrée aux travaux réalisés dans le domaine de la modélisation de la croissance et du rendement forestier. Quelques études relevant de domaines connexes (biologie, mathématique) sont citées lorsque leur implication a une pertinence avec la compréhension de l'évolution des peuplements forestiers. Avant d'aborder cette revue de littérature, il semble nécessaire de définir clairement les termes qui sont les plus employés dans le texte. Ensuite les différents types de modèles, utilisés pour la prédiction de la croissance et du rendement des peuplements forestiers, sont discutés.

1.1.2 Définitions

1.1.2.1 Modélisation

La modélisation est un processus d'analyse de données visant l'élaboration de modèles. Ces derniers sont des représentations simplifiées de certains aspects de la réalité. Dans le contexte des sciences exactes, le modèle est l'expression formelle d'une théorie. Il est constitué d'un système d'équations qui permet de suivre le comportement de certaines caractéristiques dans le temps. Ces équations sont souvent regroupées pour former des logiciels. Le terme modélisation inclut également la logique nécessaire pour relier les équations et la codification informatique pour en faire un outil utile et efficace.

Un modèle de prédiction forestière est un système qui permet de prédire la production en fonction d'un ou de plusieurs traitements sylvicoles. Actuellement, plusieurs types de modèle existent. Pardé et Bouchon (1988) distinguent sept groupes :

- les modèles dynamiques
(cas des modèles de production)
- les modèles statiques
(cas des tarifs de cubage)
- les modèles stratégiques
(cas des tables de production)
- les modèles tactiques
(simulation de l'évolution du peuplement)
- les modèles d'arbres
(compétition)
- les modèles de peuplements
- les modèles plus globaux
(gestion réelle à l'échelle d'une région).

La multitude de modèles ne résout pas nécessairement tous les problèmes. Du point de vue de l'efficacité, le meilleur modèle sera le plus simple tout en permettant de réduire un système complexe, comme les peuplements forestiers, en un système simple. Le but vise à proposer des solutions pour des problèmes concrets.

Étant donné que nous désirons construire un modèle dynamique, spécifions la définition du premier groupe de modèles. On peut lire dans Houllier *et al.* (1991) :

« Un modèle dynamique est formé par un ensemble de relations mathématiques, statistiques ou logiques qui représentent l'évolution d'un ensemble de variables descriptives d'un peuplement forestier donné ».

Le praticien utilisera le modèle en introduisant les paramètres décrivant le peuplement (issus des inventaires forestiers conventionnels). Il soumettra au programme les scénarios sylvicoles envisagés pour que le modèle fournisse l'allure prévisible des peuplements en fonction du temps pour les variables d'intérêt (hauteur, diamètre, surface terrière, nombre de tiges, volume).

1.1.2.2 Accroissement et production

Dans toute étude de prédiction du rendement des peuplements forestiers, il est important de préciser avec exactitude la variable recherchée. Par exemple, pour le volume, on précisera s'il s'agit du volume marchand brut ou du volume total. Cela facilite la recherche des relations logiques selon les conditions de cohérence qui existent entre les variables mesurées (Bouchon 1988; Cailliez 1980).

La croissance des arbres est observée sur le diamètre, la hauteur, la biomasse ou le volume. De tous les accroissements en dendrométrie, c'est l'accroissement en volume qui intéresse finalement le plus l'aménagiste forestier puisqu'il permet d'évaluer la production ligneuse. Cette évaluation est nécessaire pour l'aménagement forestier (prescriptions et interventions sylvicoles). Il convient alors de distinguer la production de l'accroissement en volume d'un massif forestier. La croissance d'un peuplement forestier est la quantité de matière ligneuse fabriquée par unité de temps. Elle est généralement exprimée de trois façons différentes :

- 1) l'accroissement moyen annuel (AMA), appelé aussi productivité (Schütz et Badoux, 1979) est le volume moyen dont le peuplement s'est accru annuellement depuis l'origine jusqu'à une année donnée. On l'estime en divisant le volume total par l'âge;
- 2) l'accroissement courant annuel (ACA) est le volume dont le peuplement s'accroît en une année donnée. C'est en fait la dérivée du volume total par rapport à l'âge;
- 3) la production totale (PT) se définit comme l'ensemble du matériel sur pied enregistré depuis l'origine, y compris les éclaircies et éventuellement le volume des arbres morts.

Dans un peuplement à structure équiennne, ces trois variables (AMA, ACA, PT) s'expriment en fonction de l'âge. L'estimation de la croissance en diamètre est obtenue par des mesures périodiques (inventaires successifs) sur les mêmes arbres, soit par carottage avec mesure des cernes annuels ou par analyse de tiges (Duplat et Perrotte 1981; Rondeux 1993). En aménagement forestier, il est important de connaître l'accroissement moyen maximal en volume et l'âge correspondant. La coupe totale permet de débiter le renouvellement du peuplement chaque fois que la production moyenne maximale est atteinte (Martinot-Lagarde 1979). Dans le cas des peuplements inéquiennes, on doit travailler avec la notion d'accroissement annuel périodique.

1.1.3 Peuplements forestiers homogènes et hétérogènes

La composition des peuplements forestiers réfère au mélange des essences présentes à un moment donné. On distingue les peuplements homogènes des peuplements hétérogènes. Par homogène, on veut dire que tous les arbres d'un échantillon ou d'une population sont similaires pour certains ou pour l'ensemble de leurs paramètres. Suivant cette définition, seuls les peuplements monospécifiques, dont les tiges présentent des caractéristiques plus ou moins semblables, appartiennent au groupe des peuplements homogènes. Tous les autres peuplements sont considérés comme hétérogènes.

On peut classer les peuplements en fonction de la composition en essences. Ils sont considérés comme étant purs ou mélangés. Ils appartiennent à ce deuxième groupe dès que le peuplement contient plus d'une essence et que l'importance en surface terrière de l'essence principale se trouve inférieure à un seuil fixé. Ce seuil varie d'un pays à l'autre; 66, 75 et 80 % sont les seuils les plus utilisés. Lorsque l'on se réfère

à l'âge uniquement, les peuplements ayant une seule classe d'âge sont dits « équiennes », ceux de plusieurs classes d'âges « inéquiennes ». Par équiennne, Vanclay (1994) spécifie que la variation de l'âge des individus doit être contenu dans une gamme maximale de 10 ans.

En général, les peuplements homogènes sont monospécifiques ou ils ont, tout au moins, une espèce représentant un pourcentage élevé de présence (au moins 66 % de surface terrière dans le cas d'une érablière au Québec). La plupart des peuplements de ce type ont une structure équiennne lorsqu'ils sont issus d'une perturbation importante. Les peuplements strictement purs sont en réalité assez rares dans les forêts naturelles; la plantation est le cas extrême et le plus caractéristique des peuplements purs et équiennes.

La caractéristique principale des peuplements hétérogènes est leur composition plurispécifique. Cette dernière varie selon le type d'association entre les espèces et les conditions de station. Le mélange des espèces ayant divers comportements (vis-à-vis de la lumière, d'association...) et des âges différents confère habituellement une structure inéquiennne à ce type de peuplement.

Il faut souligner qu'un peuplement à composition multiple ne forme pas une simple juxtaposition de peuplements purs. Il constitue plutôt un ensemble ayant une dynamique en propre (compétition, espèces...). On a cherché trop souvent à simplifier les choses pour déduire le rendement des peuplements mélangés à partir du comportement de chaque espèce croissant en peuplements purs. La transposition n'est possible que dans certaines conditions seulement (Alder (1980); cependant, on ne pourra pas vraiment distinguer la part de la compétition, des interactions entre espèces. En effet, il existe soit une synergie, soit une inhibition entre les espèces; plusieurs facteurs (âge, hauteur, espèces, environnement...) interagissent ainsi pour influencer sur le rendement des peuplements mélangés. L'étude des peuplements mélangés montre de réels avantages culturels et économiques lorsque l'on prend soin de donner à chaque essence du mélange une proportion optimale.

1.2 Revue de littérature sur les modèles de prédiction

Historiquement, les forestiers se sont souvent préoccupés d'établir des modèles simples ou des outils de décision commodes tant pour estimer que pour prévoir l'accroissement et la production des peuplements. Ces moyens devaient être capables d'orienter les activités d'aménagement (traitements sylvicoles) et de procurer des informations sur la dynamique des peuplements. Les tables de production constituent les premiers modèles utilisés pour prédire les différentes caractéristiques des peuplements forestiers. Les premières tentatives datent du XVIII^e siècle. Vanclay (1994) rapporte que les premières tables ont été publiées en Allemagne en 1787; depuis, plus d'un millier de tables sont apparues dans les différents pays à vocation forestière.

Au cours du temps, ces modèles ont évolué en fonction des objectifs, de nouvelles connaissances techniques et biologiques et de la précision recherchée. Les tables de production présentent, généralement sous forme de tableaux, l'évolution dans le temps (AGE) des caractéristiques dendrométriques des peuplements équiennes purs. L'évolution est montrée généralement par essence et par degré de fertilité de la station. Les caractéristiques sont parfois ordonnées selon une troisième variable d'état, tel un indice de densité ou un niveau de production. De nos jours, plusieurs modèles mathématiques existent. Des logiciels et des programmes informatiques sont disponibles dans le domaine de la prédiction forestière.

1.2.1 Évolution des méthodes

Comme on le verra dans la partie mathématique, les méthodes ont évolué avec la capacité d'utiliser un certain nombre d'équations de régression, d'équations différentielles et de systèmes d'équations incorporés logiquement dans un seul programme. L'évolution des procédures a grandement été favorisée par les performances grandissantes des ordinateurs. Dans un premier temps, nous allons montrer l'évolution conceptuelle des modèles avant de passer aux équations qui les caractérisent.

1.2.1.1 Tables de production

L'ancienneté des méthodes de modélisation varie selon les pays et les peuplements étudiés. L'Europe regorge des plus anciens travaux de construction et d'utilisation de tables de production à cause de sa longue tradition forestière. On peut citer quelques travaux qui ont été réalisés à partir des placettes temporaires et des placettes permanentes pour

élaborer des tables de production. Ces travaux sont rapportés par plusieurs auteurs. On trouvera des exemples pertinents dans les documents de Lemoine (1969, 1982), Assmann (1970), Delvaux (1969), Décourt (1972), Hamilton et Christie (1974) et Dagnelie *et al.* (1976, 1988). La littérature abonde sur ce sujet. Tous ces auteurs mentionnent qu'à partir des mesures prises régulièrement sur les arbres, on peut tracer des courbes de croissance et déterminer la production des peuplements forestiers.

En Amérique du Nord, on peut trouver une liste non exhaustive de quelques tables de production et des espèces concernées dans Voorhis et Scott (1986). Les plus vieilles tables de la liste sont celles de Frothingham (1914) et de Meyer (1929).

Les premières tables de production furent des tables normales parce qu'elles sont issues des données d'inventaires provenant de peuplements pleins (complets), sans vide. Ces peuplements sont non perturbés et généralement monospécifiques. Dans les tables normales, on retrouve une description globale du peuplement et les valeurs retenues sont des moyennes et des sommations des variables dendrométriques étudiées; le tout étant basé sur des hypothèses simples comme la célèbre loi d'Eichhorn décrite par Martinot-Lagarde (1979) et commentée par Duplat (1979), Pardé et Bouchon (1988) et Bégin (1991). La production de ces tables est estimée en fonction de l'âge et de la qualité de station. On retiendra qu'on rend davantage compte de l'interaction entre les potentialités propres (génétiques) du peuplement et celles de la station où le peuplement s'est installé (sol, climat). Des exemples de telles tables sont présentés dans Pardé et Bouchon (1988). Au Canada, les tables normales de Plonski (1981) et de Vézina et Linteau (1968) sont des références intéressantes dans cette généalogie des tables. La faiblesse des tables normales réside dans la détermination de la « normalité » de la densité des peuplements. Cette opération est entachée de subjectivité lorsqu'on décide qu'un peuplement est sans vide (trouée) et non perturbé. Les tables normales sont des modèles considérant souvent des situations idéales à poursuivre dans l'aménagement (Avery et Burkhart 1983).

Depuis, les méthodes ont beaucoup varié étant donné les difficultés d'ajuster graphiquement les courbes aux données. Les différences rencontrées entre régions écologiques ont aussi influencé les méthodes afin d'éviter des extrapolations grossières. Des équations mathématiques ont alors été formulées d'abord sur la base des graphiques, ensuite à l'aide des mesures successives effectuées sur les arbres.

On sait qu'en disposant de deux points (ou mesures consécutives) issus d'un même peuplement, on est capable de tracer un vecteur d'évolution. En possédant deux mesures, une initiale et une finale, il est possible de calculer la différence entre ces deux temps. Cette différence de production peut être estimée au moyen d'équations différentielles que l'on intègre pour estimer le développement du peuplement.

D'autres auteurs (Schumacher et Coile 1960; Coile et Schumacher, 1964; Burkhart, Parker, Strub et Oderwald, 1972) ont construit des expressions de croissance et de rendement des peuplements entiers. Jusqu'en 1960, des équations indépendantes ont été développées pour prédire la croissance et le rendement. En 1962, Buckman a introduit un modèle concernant le pin rouge (*Pinus resinosa* L.) où le rendement est obtenu par l'intégration mathématique de l'équation de croissance. Clutter (1963) a développé un modèle compatible de croissance et de rendement des peuplements de pin à l'encens (*Pinus taeda* L.). De leur côté, Sullivan et Clutter (1972) ont regroupé les équations trouvées précédemment par Clutter. Celles-ci ont servi à développer des modèles simultanés de croissance et de rendement, donnant en plus de l'apport analytique, une consistance numérique des prédictions de croissance et de rendement.

Dans le but de mieux refléter la réalité des peuplements forestiers, on est passé des tables de production normales aux tables de production empiriques à densité variable. En Europe, on cite comme exemples les tables de production à densité variable de Bartet (1976). En Amérique du Nord, outre les tables empiriques élaborées par Boudoux (1978), des tables à densité variable ont été publiées par Bolghari et Bertrand (1979) et par Carpentier *et al.* (1989, 1993).

Pour le calcul du rendement, les tables à densité variable diffèrent des tables normales puisqu'elles ajoutent une troisième variable (la densité) aux deux variables déjà considérées (l'âge et l'indice de qualité de station [IQS]). Cette troisième variable peut être exprimée par un indice de densité (ID). Dans le cas de Carpentier *et al.* (1989), l'indice de densité est estimé en fonction du nombre de tiges totales et du diamètre moyen quadratique. Les tables de production à densité variable appartiennent à la catégorie des modèles simples de production dans lesquels on peut faire varier la densité initiale, l'âge et l'intensité des éclaircies (Bouchon, 1988).

Les études d'arbres par analyse de tiges ont suscité beaucoup d'intérêt en Europe pour déterminer la croissance et l'évolution des peuplements. Cepen-

dant, l'absence des cernes annuels sur certains arbres, le coût élevé de l'outillage technologique et l'abattage obligatoire des arbres constituent les raisons qui ont ralenti l'enthousiasme des chercheurs sur cette voie. L'analyse de tiges demeure néanmoins une source valable de données pour étudier la croissance des arbres et des peuplements forestiers (Rondeux 1993) dans des cas spécifiques.

En Amérique du Nord, l'abondance d'observations en accroissement dans des placettes permanentes a engendré la conception d'une série de tables de production basées sur des équations différentielles. Cependant, la plupart de ces modèles sont basés sur le diamètre moyen de l'ensemble des arbres du peuplement et ils ne permettent pas d'apprécier la valeur des produits par catégorie de grosseur (classe de DHP).

La distribution des arbres par catégorie de dimensions apporte une amélioration qui permet l'analyse de la distribution des arbres par classe de diamètre et parfois par classe de hauteur. Ceci tend à satisfaire du même coup aux exigences de l'aménagiste et des utilisateurs de la matière ligneuse, notamment en ce qui concerne l'estimation de la valeur des produits par catégorie de dimension.

Plusieurs auteurs ont suivi cette piste en effectuant des études sur la répartition du nombre d'arbres et du volume par catégorie de circonférence ou de diamètre. Parmi eux, on retient les travaux de Palm (1988), Bailey et Dell (1973) et Carpentier *et al.* (1989). Trois approches de modèles sont issues de l'introduction de la distribution par classe de diamètre :

- 1^o) les modèles décrivant la distribution des arbres par classe de diamètre ou de hauteur à différents moments de l'existence du peuplement;
- 2^o) les modèles qui définissent, a priori, des classes fixes (limites invariantes au cours du temps), et qui analysent les flux d'arbres entre les différentes classes formées;
- 3^o) les modèles dont les classes sont déterminées par rapport aux arbres qui composent la classe à un moment donné (temps initial), ce qui permet d'étudier l'évolution moyenne des arbres dans chaque classe formée. Dans ce cas, les limites des classes varient avec le temps.

Des trois approches précédentes, la troisième aboutit logiquement aux modèles « arbre individuel » lorsque le nombre de classes grandit.

Les méthodes de construction des tables ont évolué avec le temps. On est parti des graphiques tracés manuellement, pour passer par des équations établies à partir des courbes par résolution statistique (régressions linéaires puis non linéaires...) et actuellement des simulations de tout genre sont produites par ordinateur pour prédire l'évolution chronologique des paramètres dendrométriques retenus.

Curtis (1972) procède à une revue des méthodes d'établissement des tables de production tandis que Hamilton et Christie (1974) indiquent les objectifs visés par les tables de production, à savoir :

- simuler les effets de divers traitements sylvicoles;
- prédire la croissance des arbres ou la production du peuplement.

La construction des tables de production est toujours d'actualité comme moyen de prédire le rendement, malgré la profusion d'autres types de modèles. Des études récentes de production passent encore par des travaux d'établissement de tables de production. C'est le cas de Bégin (1991) qui, suivant les traces de Schütz et Badoux (1979), a établi des tables de production pour des plantations de douglas vert réalisées en Suisse.

1.2.2 Conception et typologie des modèles de croissance

Les mesures prises sur le terrain pour des caractéristiques dendrométriques (diamètre, hauteur, longueur du houppier, surface terrière, etc.) constituent des variables indépendantes afin d'établir le rendement en volume. Il faut des relations allométriques entre ces caractéristiques afin de déterminer des équations valables qui expliquent les différents phénomènes de croissance et de production des peuplements forestiers.

Les dendrométriciens ont emprunté les relations allométriques vérifiées en biologie animale (Tessier 1948) et ont pu, grâce à la biométrie et à l'informatique, préciser et quantifier mathématiquement les résultats observés sur le terrain. Il est important de retenir que les relations entre les variables mesurées peuvent différer en fonction de la structure du peuplement concerné (équienne ou inéquienne).

Nous présentons dans les prochains paragraphes la typologie des modèles avant d'analyser des équations caractéristiques de ces modèles.

Pour percevoir les changements intervenus dans la catégorisation des modèles, il faut suivre leur évolution dans le temps. Hamilton et Christie (1974) ont proposé deux approches de construction de modèles de prédiction de la production :

- au niveau global (peuplements) et
- au niveau individuel (arbres).

Ils ont, en outre, indiqué quatre champs d'application des tables de production :

- la prédiction de la production
- l'évaluation des différents traitements sylvicoles
- l'évaluation
- le contrôle de la production.

Après quelque temps, ce sont les travaux de Munro (1974), de Shugart et West (1980), de Houllier (1986) et de Houllier *et al.* (1991) qui ont consacré la catégorisation des modèles. Ces auteurs ont classifié intuitivement les modèles selon l'entité mesurée (arbre ou peuplement). De toutes ces classifications, on distingue, selon la chronologie d'apparition des modèles :

- a) les modèles « peuplement entier » (en anglais : *whole stand models, stand models, forest models*) avec ou sans distribution diamétrale;
- b) les modèles « arbre individuel » dépendants ou indépendants de la distance entre les tiges (en anglais : *distance-dependent models, single-tree spatial models, distance-independent tree models, single-tree non-spatial models*).

1.2.2.1 Modèles de peuplement entier

Les tables de production normales et leurs variantes à densité variable sont les archétypes de cette catégorie de modèles. Les plus simples et les plus étudiés de ces modèles sont ceux qui s'adressent aux peuplements purs, pleins et équiennes (Plonski 1981; Lemoine, 1969). L'évolution des variables dendrométriques du peuplement (hauteur dominante, diamètre en moyenne quadratique, surface terrière, volume marchand brut) est estimée en fonction de l'âge du peuplement; on obtient des prédictions satisfaisantes du rendement à l'aide des relations établies.

Les modèles de peuplement permettent de simuler, grâce aux inventaires des peuplements, la dynamique de ceux-ci; ils procurent au forestier des informations nécessaires pour optimiser sa gestion (Adams et Ek 1975; Michie 1985). En principe, les tables de production doivent être basées sur des données représentant toutes les combinaisons d'âge,

de qualité de station et de traitements sylvicoles dont les estimations sont souhaitables (Becker et LeGoff 1988). Mais en pratique, ce n'est pas facile de réunir toutes ces conditions. Ceci explique les diverses extrapolations faites généralement dans les tables tout en compromettant leur fiabilité.

Pour les peuplements mélangés, l'âge devient une variable difficile à évaluer par rapport aux peuplements purs. Curtis (1972) propose des comparaisons entre les indices de station des espèces individuelles constituant le mélange, alors que Gibbs (1963) juge que les dimensions de l'arbre ne sont pas de bons indicateurs de l'âge : il suggère d'utiliser l'âge même en peuplements mélangés et irréguliers.

On notera que la nature n'offre pas toujours des peuplements purs et équiennes. Curtis (1976) discute des difficultés rencontrées dans l'estimation du rendement des peuplements inéquiennes. Il présente une procédure pour étudier les peuplements mélangés : soit par les différentes espèces présentes dans le mélange, soit par la projection dans le temps des paramètres globaux représentant l'ensemble des essences. La complexité du comportement des espèces et l'hétérogénéité des connaissances sont à l'origine de la diversité des modèles et des techniques rencontrées dans les études de prédiction du rendement. On précise maintenant quelques pistes déjà explorées pour décrire l'évolution des peuplements mélangés.

a) Étude du peuplement par essence

La connaissance du comportement d'une essence en peuplement pur permet de prédire son évolution dans un peuplement mélangé. On peut considérer un peuplement pur et équienne comme la variation extrême d'un peuplement mélangé et inéquienne. Mais comme le fait remarquer Turnbull (1963), il est difficile d'établir la part de la compétition interspécifique et d'arriver à un modèle qui rende mieux compte de la réalité.

D'après Cochran (1967), il peut être possible de diviser une population hétérogène en sous-populations ou « strates », chacune d'elles peut être considérée comme intrinsèquement homogène. Si chaque strate est homogène, alors, un estimé précis de la moyenne de chacune d'elles peut être obtenu par un petit échantillon de chaque strate. Ces estimés peuvent alors être combinés pour produire un estimé précis du peuplement ou de la placette. Cependant, l'échantillonnage doit couvrir le plus de conditions possibles (qualité de station, composition des espèces...) pour expliquer la variabilité de croissance.

b) Étude du peuplement dans son ensemble

Dans ce cas, on considère que l'évolution est identique pour chacune des essences, donc la composition relative est invariable. Pour obtenir des résultats consistants, il devient nécessaire de posséder deux séries de mesures temporelles dans les placettes pour estimer des taux globaux de changement.

Les modèles utilisés pour les peuplements mélangés sont les suivants :

- les fonctions statiques de rendement;
- les matrices de transition reflétant la probabilité de transfert des tiges d'une catégorie de diamètre à d'autres immédiatement supérieures, ou encore à la probabilité de maintien des tiges dans leur catégorie de DHP d'origine. Alder (1980), Mertens et Gennart (1985) décrivent l'utilisation des chaînes de Markov;
- les équations différentielles (Moser 1974; Jayaraman et Bailey 1988).

La faiblesse des modèles « peuplement entier » réside dans le fait qu'ils ne donnent pas de distribution de produits (bois) par catégorie de diamètre. Pour pallier à ce problème, une sous-catégorie a été constituée, on la retrouve à la section suivante.

1.2.2.2 Modèles de peuplement entier avec distribution diamétrale

De Liocourt (1898) a statué que la structure des peuplements inéquiennes est décrite adéquatement par une courbe exponentielle négative, dite courbe en « j » inversé. Il a pu calculer une valeur de « q » qui est la raison d'une progression géométrique de la distribution des tiges par classe de diamètre. La valeur de « q » est calculée en divisant le nombre de tiges de la classe de diamètre désirée par le nombre de tiges de la classe suivante. La distribution des tiges par classe de diamètre de chacun des peuplements est définie par une valeur de « q » et par le diamètre de sa plus grande classe.

Plus tard, Leak (1964) a déterminé le paramètre q comme une fonction du DHP et il a obtenu une fonction linéaire. Le diamètre est un bon paramètre pour suivre la croissance d'un peuplement car il est facile à mesurer; il est relié au volume ainsi qu'à d'autres paramètres de l'arbre. En 1953, Meyer a pu vérifier que la connaissance de la distribution de Liocourt ainsi que de certaines caractéristiques de structure et de croissance, aboutissaient à une bonne estimation des rendements futurs. La loi tronquée présentée par Chevrou (1990) est une nouvelle loi de distribution des

nombres d'arbres par catégorie de diamètre. Les propriétés de cette loi semblent expliquer diverses « anomalies » observées par les forestiers (excès dans la fréquence de tiges moyennes et déficit fréquent de grosses tiges, relation mal expliquée entre la station et le coefficient « q » de Liocourt) et permettent la détermination d'une valeur raisonnable du diamètre d'exploitabilité.

Les modèles populaires fournissent la distribution diamétrale pour prédire le rendement des peuplements. La caractéristique principale de ces modèles est le type de fonction de densité de probabilité utilisée. L'étude de Knoebel *et al.* (1986) est un exemple de modèle de peuplement qui, en utilisant l'âge et la densité, prédit le volume, la surface terrière et le nombre de tiges. Dans ces modèles, la distribution est déterminée par une fonction de densité qui donne la répartition des produits par catégorie de dimensions (diamètre ou hauteur). Les fonctions de densité les plus utilisées dans ces modèles sont les fonctions Bêta et de Weibull.

Les auteurs, Clutter et Bennett 1965, prédisent les paramètres de la distribution Bêta à partir des variables âge, indice de qualité de station et densité afin de déboucher sur une distribution diamétrale approximative. En 1967, McGee et Della-Bianca ont suivi la même procédure dans leurs travaux de recherche concernant des peuplements de liriodendron (*Yellow poplar* ou *Liriodendron tulipifera* L.). Une approche similaire est signalée par Lenhart et Clutter (1971), Burkhart et Strub (1974) dans les plantations de pin à l'encens (*loblolly pine* ou *Pinus taeda* L.). La fonction de Weibull est plus flexible que la fonction Bêta à cause de ses trois paramètres; elle est aussi plus utilisée et plus populaire dans la modélisation de la croissance et du rendement des peuplements forestiers. On l'apprécie surtout pour sa grande flexibilité (forme et simplicité des dérivations mathématiques) même si Davis, cité par Leak (1964), émet le commentaire suivant :

«... a good diameter distribution is determined by the biology of forest and the purposes of management and not by mathematics ... ».

La distribution de Weibull est décrite par Bailey et Dell (1973). On peut se servir de cette distribution a posteriori. Une fois les prédictions réalisées, les tiges sont réparties par classe de DHP à l'aide de la fonction de distribution. Cette procédure a été utilisée par Carpentier *et al.* (1989).

Hyink (1979) rapporte une méthode généralisée pour projeter la distribution des tiges par classe de diamètre, applicable aux peuplements forestiers inéquiennes. Cette méthode est basée sur la connaissance du nombre de tiges à un temps t donné et des vecteurs des paramètres d'une fonction de densité au temps t afin de faire la projection aux temps $t+1$, $t+2$, ...

Pienaar et Harrison (1988) utilise la projection de la table de peuplement (distribution de tiges par classe de diamètre) à un âge futur, en émettant l'hypothèse que la variation se fait à l'intérieur des classes de diamètre.

La différence avec la sous-catégorie précédente se situe au niveau des limites des classes. Dans ce dernier cas, les classes de DHP ont des largeurs fixes de deux ou de cinq centimètres. Leary (1979) a développé ce type de modèle de croissance pour les arbres survivants par classe de hauteur et de diamètre; l'évolution des paramètres du peuplement est suivie selon la moyenne des classes de dimensions.

La majorité des travaux sont réalisés en plantations ou en peuplements monospécifiques équiennes. Certains chercheurs ont innové. En particulier, Turnbull (1963) ainsi que Ek *et al.* (1974) qui ont développé ces modèles pour des peuplements mélangés et inéquiennes.

1.2.2.3 Modèles « arbre individuel »

La logique demanderait de commencer par cette catégorie de modèles, étant donné que les mesures sont prises en plantation ou en milieu naturel sur des arbres individuels. Mais la masse d'informations qu'il faut récolter sur le terrain, la force des hypothèses de base (loi de la moyenne, loi de Eichhorn ...) et le manque de moyens techniques (informatique) ont favorisé la catégorie de modèles « peuplement entier » qui est décrite au point précédent.

Les modèles « arbre individuel » sont les plus raffinés, ils exigent les renseignements nécessaires pour déterminer la compétition que subit chacun des arbres. Pour ce type de modèle, les recherches sont les plus avancées en Amérique du Nord à cause de l'abondance des informations recueillies dans des placettes-échantillons permanentes. Les chercheurs ont subdivisé la catégorie en trois sous-catégories de modèles selon un critère de localisation spatiale :

- les modèles « arbre individuel » indépendants de la distance (*distance-independent models, single-tree non-spatial models*), par exemple les systèmes de simulation : *PROGNOSIS*, *STEMS*, *ORGANON* (Wykoff *et al.* 1982);
- les modèles « arbre individuel » dépendants de la distance (*distance-dependent models, single-tree spatial models*) où la localisation des arbres par rapport à leurs voisins est connue;
- les modèles « arbres individuels » dépendants de la distance avec étude du houppier (Mitchell *et al.* 1983). Cette sous-catégorie est plus contraignante que la précédente car les caractéristiques du houppier doivent être connues.

1.2.2.4 Modèles « arbre individuel » indépendants de la distance

Les modèles indépendants de la distance sont simples, robustes et relativement efficaces (Houllier *et al.* 1991). Le peuplement est caractérisé par une liste d'arbres, sans référence à leur localisation spatiale. L'accroissement individuel dépend à la fois de variables du peuplement et de variables dendrométriques caractérisant l'individu.

1.2.2.5 Modèles « arbre individuel » dépendants de la distance

À partir de données récoltées à deux périodes différentes, il est possible d'élaborer des modèles dépendants de la distance. Ces modèles nécessitent la localisation exacte de chacune des tiges. Ils simulent l'évolution de l'état de chacun des arbres au cours de leur vie, en tenant compte des différentes interventions sylvicoles (éclaircies) et de la position des arbres par rapport à leurs voisins (compétition). Avec ces modèles, il est possible de simuler l'effet de densités variables de plantations ou de diverses modalités d'éclaircies. Daniels et Burkhart (1988) ont utilisé un modèle « arbre individuel » dépendant de la distance et la fonction de Chapman-Richards pour modéliser l'évolution d'un peuplement. Ces modèles « arbre individuel » ont comme objectif principal de rendre compte du développement des individus en considérant la compétition qu'ils se font mutuellement. Ainsi, ils permettent de prédire l'influence des divers types d'éclaircie.

Comparés aux modèles « peuplement entier », les modèles de croissance « arbre individuel » dépendants de la distance (diamètre, hauteur, volume ou cime) offrent un intérêt plutôt théorique pour étudier des scénarios sylvicoles. Ils représentent un moyen efficace pour déterminer le degré de compétition entre les arbres, la mortalité et la croissance individuelle de la hauteur, du diamètre ou de la cime. En pratique, ces

modèles sont d'une utilisation difficile à cause des multiples observations qu'ils requièrent et de la complexité des simulations (Haight et Getz 1987). Les modèles « peuplement entier » associés à des techniques d'optimisation permettent d'analyser les options d'aménagement (Adams et Ek 1975). Le grand avantage de ces modèles simples est de prédire le rendement des peuplements avec peu de paramètres et de décrire les peuplements selon la distribution des tiges par classe de diamètre. En outre, ces modèles présentent presque la même précision que les modèles « arbre individuel » (Buongiorno et Michie 1980; Haight et Getz, 1987).

Pour le choix de modèles en aménagement forestier, les comparaisons précédentes montrent que les modèles « peuplement entier » sont plus avantageux que les modèles « arbre individuel » pour les peuplements purs et équiennes. En effet, ils sont plus simples et plus maniables pour réaliser des projections du rendement des peuplements. L'une des qualités de ces modèles est le fait que leurs équations contiennent moins de paramètres et qu'ils se prêtent mieux à la recherche d'une solution optimale par approximations successives.

1.2.3 Fonctions et équations de prédiction

Les modèles de croissance ont une base mathématique. Pour être efficace, le modèle doit être fondé sur des hypothèses logiques de la croissance des arbres ou des peuplements considérés. En biologie, les modèles mathématiques ont été beaucoup étudiés et développés. Des modèles mathématiques fonctionnels proviennent de propositions logiques des relations entre variables. Les modèles de prédiction sont formulés sous forme de systèmes d'équations ou de fonctions qui reflètent le plus possible la dynamique des peuplements. Les équations rendent compte de l'accroissement des arbres survivants, du passage des tiges d'une classe de diamètre à une autre, de la mortalité ainsi que du phénomène du recrutement. La figure 1.1 nous indique la position relative de la modélisation et les domaines communs.

On distingue deux types de modèles lorsque l'on se réfère à des procédures d'utilisation différentes :

- des modèles déterministes : lorsque la valeur exacte de la variable dépendante est prédite par une fonction de variables indépendantes,
- des modèles probabilistes (stochastiques) : lorsqu'une valeur probable de la variable dépendante est prédite par une fonction de variables indépendantes.

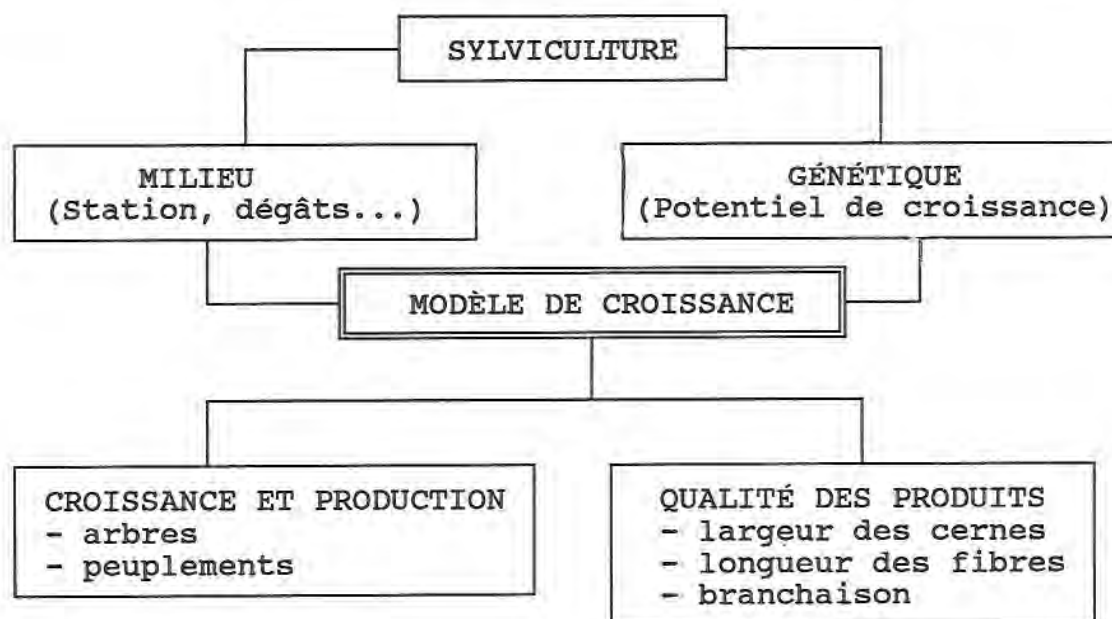


Figure 1.1. Schéma d'intégration et de synthèse des connaissances au travers de la modélisation, inspiré de Houllier *et al.* (1991).

La modélisation mathématique du rendement des peuplements offre plusieurs avantages. La prédiction du rendement se fait à partir des tables de peuplement; on élabore alors des modèles basés sur l'accroissement en hauteur, en diamètre ou en surface terrière. Le volume de l'arbre est estimé si le DHP et la hauteur sont connus, mesurés ou calculés (Arabatzis et Burkhart 1992). Les modèles permettent de projeter ces estimations dans le temps. Assmann (1970) souligne l'avantage de la formulation mathématique :

« The mathematical formulation in any case offers great advantages because it enables compressed statements to be made, and permits control over the certainty of statements by means of statistical methods. »

Selon Vancly (1991), la prédiction de l'accroissement en diamètre se fait comme dans les modèles de croissance en indiquant la proportion d'arbres qui passent d'une classe à une autre. Les équations différentielles ont été beaucoup utilisées pour obtenir des estimations valables de la croissance et du rendement dans des peuplements équiennes. Ces équations sont établies en fonction de l'âge, de l'indice de qualité de

station et de la densité (Buckman 1962; Clutter *et al.* 1965). Moser (1974) a modélisé l'évolution des tables de peuplements inéquiennes à l'aide des équations différentielles. Les techniques utilisées dans la modélisation pour étudier la production forestière sont le plus souvent des estimations de coefficients par des régressions linéaires et non linéaires (Alder 1980).

Les expressions biomathématiques ont été examinées en détail par Pienaar (1966) et Turnbull (1963) dans les peuplements purs et dans les peuplements mélangés. Ces auteurs ont insisté sur les modèles « biologiquement raisonnables » en suggérant la fonction de Chapman-Richards qui s'adapte bien à la croissance des arbres et des peuplements forestiers. Lynch et Moser (1986) ont développé une technique particulière de prédiction du rendement en peuplements mélangés, technique donnant la prédiction de la table de peuplement applicable aux peuplements tant équiennes qu'inéquiennes à partir d'un système d'équations différentielles. Ces équations décrivent la croissance en diamètre, en hauteur, en surface terrière et en volume. Les courbes de croissance de Richards (1959) sont les plus utilisées pour prédire la croissance en hauteur et pour déterminer

la qualité de la station. On se référera aux travaux de Carmean publiés en 1970 et en 1978 pour examiner les méthodes d'estimation. Pour les peuplements inéquienues, l'âge, une variable importante de ces équations, est remplacé par le DHP. On utilise alors la relation allométrique qui existe entre la hauteur d'un arbre et son diamètre (Arabatzis et Burkhart 1992).

Plusieurs modèles sont proposés pour prédire l'accroissement en diamètre. La croissance périodique peut être un bon indice de la qualité de station car l'accroissement en diamètre est fonction de la surface terrière et de l'indice de qualité de station. Bégin (1991) décrit une façon de prédire l'accroissement en diamètre en se servant de l'âge, de l'indice de qualité de station et du niveau de production. L'estimation de l'accroissement est utile pour évaluer la productivité et projeter la croissance en volume dans le temps (Leary 1968). Lowell et Mitchell (1987) ont démontré que l'accroissement en diamètre et la mortalité des arbres individuels peuvent être estimés simultanément en utilisant des fonctions logistiques. Une fonction logistique forme un cas particulier du modèle de Chapman-Richards. La mortalité est un phénomène très difficile à modéliser comme le font remarquer Burkhart et Strub (1974). La prédiction de la mortalité et de la croissance en DHP à partir d'équations de prédiction de différences a donné de bons résultats avec des combinaisons d'indices de qualité de station, de densité initiale et d'intensité d'éclaircie (Goulding 1972) pour le douglas (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco var. *menziesii*).

C'est Beers (1962) qui, le premier, a étudié l'évolution des peuplements forestiers en fonction des phénomènes suivants :

- le recrutement
- la mortalité
- la croissance des survivants.

Moser (1974) a amélioré cette méthode en ajoutant une distribution des tiges en six classes de diamètre, où chacun des trois phénomènes est pris en compte. Shifley *et al.* (1978) ont utilisé presque la même méthode mais sans distribution des tiges par classe de diamètre; leur simulateur de croissance et de rendement (*E-A-C*) est basé sur les données de la surface terrière et du nombre de tiges. Dans sa modélisation des peuplements feuillus par des équations différentielles non linéaires, Ek (1974) décrit les phénomènes du recrutement, de la mortalité et de la croissance des survivants en terme de nombre de tiges par classe de diamètre dont la largeur est de cinq centimètres.

Knoebel *et al.* (1986) ont produit des modèles de croissance et de rendement qui permettent d'évaluer les options d'éclaircie à l'aide d'équations simultanées de croissance et de rendement.

Bruner et Moser (1973) ainsi que Peden *et al.* (1973) ont utilisé des modèles de Markov comme un palliatif au système par équations différentielles pour simuler le rendement des peuplements forestiers. Les chaînes de Markov ont été testées par Mertens et Gennart (1985) dans la futaie jardinée pour décrire l'évolution des peuplements et le calcul des accroissements sans biais. Ung *et al.* (1982) ont mis sur pied un modèle de prédiction de la croissance des essences feuillues et résineuses d'une région du Québec. Ce modèle est basé sur l'estimation des taux de croissance par rapport au temps relatif suivant une approche systémique qui tient compte des trois phénomènes décrits par Beers (1962). Amateis *et al.* (1986) ont utilisé le modèle quotient pour des plantations. Ce modèle utilise les caractéristiques du peuplement (âge, indice de qualité de station, surface terrière et nombre de tiges par acre) en fonction de la portion totale du peuplement à un certain diamètre.

Buford (1991) a développé quatre modèles prédisant la croissance et le rendement en plantation de pin à l'encens (*Pinus taeda* L.) par rapport aux conditions observées. Différents simulateurs sont publiés dans la littérature pour prédire le rendement. Ces simulateurs s'adressent à toutes les catégories de modèles connus.

Edminster *et al.* (1991) ont mis au point un programme informatique pour produire des modèles compréhensibles de croissance et de rendement à utiliser dans les peuplements mixtes de conifères et dans des peuplements purs de pin (*Pinus ponderosa* var. *scopulorum* Engelm.). Ce programme produit des tables semblables à celles publiées par Meyer (1929).

Pour les modèles « peuplement entier », par exemple, le programme *RMULD* (Edminster 1978) établit les attributs moyens du peuplement et les caractéristiques globales. Mowrer (cité par Edminster *et al.* (1991)), avec son programme *ASPORM*, ajoute la distribution diamétrale des tiges aux valeurs usuelles du peuplement.

On retrouve dans le groupe des modèles « arbre individuel » indépendants de la distance « individual tree distance-independent models », des modèles applicables à plusieurs structures d'âge et à plusieurs espèces (Stage 1973; Wykoff *et al.* 1982). Mais, comme indiqué précédemment, ces modèles sont difficiles à élaborer et exigeants au niveau des intrants.

Citons aussi le simulateur SYLVA de Pretzsch (1990) permettant de simuler la croissance dans les peuplements purs ou mélangés. Dans ce dernier cas, la surface vitale allouée à chaque tige est pondérée par un poids spécifique à chaque essence.

L'utilisation des matrices de transition permet de prédire le rendement. Mais Alder (1980) indique qu'à chaque peuplement et pour chaque intervalle de temps observé, correspond une matrice de transition (probabilités de changement). Avec cette méthode, il n'est pas simple de construire un modèle de prédiction qui tient compte de ces changements d'état.

Buongiorno et Michie (1980) ont développé un modèle basé sur des matrices de transitions statiques. Dans ce modèle, le nombre de tiges recrues entrant dans la plus faible classe de DHP, est déterminé par régression. Solomon *et al.* (1986) utilisent les propriétés des matrices de transition dans leur programme *FIBER* pour modéliser l'arrivée des recrues, la croissance des survivants et la mortalité des tiges dans différents types de peuplements forestiers. *FIBER* comprend des équations polynomiales multiples pour estimer les probabilités de transition des arbres. Ces équations utilisent entre autres la densité globale, l'importance relative d'une essence et la position relative d'une classe de DHP comme variables indépendantes, ce qui rend le système dynamique. Mais le modèle ne permet des prédictions qu'à des intervalles de cinq ans. Cette durée correspond à l'intervalle entre les mesurages. Harrison et Michie (1985) ont apporté un moyen fiable pour déterminer des valeurs à n'importe quelle année intermédiaire à un intervalle de mesurage. La méthode est basée sur l'analyse des matrices de transition à l'aide d'un code de programmation non linéaire *GRG2* (Lasdon et Waren 1986).

1.3 Autres modèles de prédiction

1.3.1 Modèles de succession (*Succession models*)

Les modèles de succession sont appliqués uniquement dans des études de succession écologique. Un espace (*gap*) est créé par la mort d'un arbre ou par la chute de branches importantes. Un nouvel arbre peut occuper l'espace disponible. L'essence peut être différente et ainsi la composition des peuplements devient dynamique. Ce type de modèle est habituellement incapable de produire des prédictions fiables sur les rendements en matière ligneuse. Il est donc peu utile pour des fins d'aménagement forestier (Vanclay 1994).

1.3.2 Modèles architecturaux

Ces modèles s'intéressent à la morphogénèse (déterminisme de la fourchaison, tailles de formation, développement du houppier) qui caractérise les modes de ramification et à la croissance individuelle des arbres. Ces modèles sont utilisables notamment dans les plantations feuillues à larges espacements où il y a des problèmes d'élagage naturel. Des tentatives sont faites pour prédire le développement architectural d'un arbre et l'influence de l'élagage. Actuellement, il est difficile de les utiliser pour la modélisation des arbres placés en position de croissance libre.

Pour construire ce type de modèle, on doit avoir des connaissances de deux types :

- biologique (orthotropie, plagiotropie)
- statistique (niveau de ramification, position des fleurs).

Il faut noter que la capacité limitée des ordinateurs n'a pas aidé à la diffusion de ce type de modèle.

1.3.3 Modèles globaux et modèles de gestion

C'est une catégorie de modèle qui apporte des indications pour gérer une forêt et non un peuplement théorique ou particulier, équienne et pur. Ce système rend compte des interactions complexes existant dans les mélanges d'espèces, de l'influence des densités de plantation, des régimes d'éclaircies et des risques de dégâts. Ces modèles existent sous forme de logiciels ou de sous-programmes. L'utilisateur introduit les paramètres décrivant les peuplements qu'il veut gérer. Ensuite, il soumet les divers scénarios (dates et intensités d'éclaircie, plantation, fertilisation, risques de chablis) pour aboutir aux choix qui optimisent la gestion de la forêt. Le modèle SYLVA du Québec appartient à cette catégorie de modèles.

Selon les remarques précédentes et avant de tirer une conclusion sur la revue bibliographique, mentionnons que la modélisation constitue un domaine prioritaire et en perpétuelle mutation. Nous pensons que les données disponibles au ministère des Ressources naturelles du Québec et nos travaux antérieurs sont des éléments qui vont nous guider dans la recherche d'une méthode pour prédire mathématiquement le rendement des peuplements à composition multiple rencontrés au Québec. La littérature nous indique que ce type de modèle a été étudié sommairement ailleurs. La construction de modèles pour les peuplements du Québec produit des outils importants pour aider l'aménagiste forestier dans sa prise de décision. Ils aident aussi à comprendre la croissance et le développement des espèces croissant en peuplements mélangés.

1.4 Conclusion de la revue de littérature

Plusieurs tentatives, surtout en Europe et en Amérique du Nord, ont été faites pour développer des modèles de prédiction de la croissance et de la production. Elles concernent principalement les peuplements homogènes, purs et équiennes dont la structure et l'âge facilitent la modélisation. Les peuplements hétérogènes (mélangés) ont fait aussi l'objet de quelques études dont celles signalées par Pienaar *et al.* (1988), Stiff (1979) et Houllier *et al.* (1991). Les forêts présentent souvent une composition multiple; des recherches en modélisation dans cette optique ont leur pertinence pour la compréhension des interactions entre les espèces et pour la prédiction du rendement de ces peuplements mélangés.

Les méthodes modernes de modélisation utilisent beaucoup l'informatique. Il faut garder à l'esprit qu'un modèle, aussi fidèle qu'il soit, sera toujours confronté aux données recueillies par l'observation et l'expérimentation pour sa validation. Un modèle est déduit d'une théorie allométrique. Il reste valable pour les extrapolations. Cependant, il semble prudent de faire des projections qui ne dépassent pas trop l'âge (ou les dimensions) des données de base.

Faut-il aussi être très prudent dans la construction et l'application des modèles ? Turnbull (1963) suggère quelques réflexions lorsqu'il affirme :

« A model is only one way of looking at the world. Growth and yield represents the level of certain characteristics of a tree or stand over time ... »

« At present, there exists no mathematically integrated system whereby growth and yield of the whole stand can be reduced to growth of stand components; nor is there such system for reduction of total volume growth into its elements ... ».

Les modèles basés sur les moyennes de peuplement sont développés pour des peuplements de composition pure et de structure équiennne. Ils ne permettent pas la distribution des tiges par classe de DHP. Les modèles de type « arbre individuel » dépendants de la distance caractérisent l'accroissement en diamètre et en hauteur sur une base individuelle. Le développement d'un échantillon d'arbres est simulé sur une période de un à cinq ans. Les estimations des accroissements reposent sur la localisation et même, sur la forme de la cime de chaque arbre. Arney (1985) indique qu'il faut avoir le positionnement de chaque arbre par rapport à ses voisins et recueillir des données (diamètre, hauteur, cime) sur chaque arbre. Cette multitude de données exige des travaux dispendieux de cueillettes d'information dendrométrique et demande beaucoup de temps sur ordinateur pour les traitements subséquents. Ces exigences rendent ces modèles difficilement utilisables par les aménagistes forestiers.

En ce qui concerne les modèles « arbre individuel » indépendants de la distance (cas de *ORGANON* conçu par Hann et Larsen, 1990), la considération spatiale est exclue. Ils ont trait à toutes les classes de dimension, d'âge et d'espèces mélangées; ils ont l'avantage de permettre une exécution plus rapide sur ordinateur.

Des techniques avancées, comme celles utilisées dans l'élaboration des matrices de transition (Harrison et Michie 1985; Getz et Haight 1989), permettent de prédire le rendement des peuplements forestiers avec plus de précision et surtout d'optimiser les options d'aménagement. Les modèles matriciels offrent une piste intéressante pour effectuer des prédictions du rendement et de la croissance des peuplements forestiers.

Chapitre deux

Matériel et méthode

2.1 Spécification du champ d'application

Le présent travail de recherche est orienté vers le champ très précis d'application que constituent les bétulaies jaunes à résineux composées principalement de feuillus ou de résineux. À partir de la publication de Perron *et al.* (1994b), nous spécifions ce champ en employant la norme du Service des inventaires forestiers (SIF) du ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN).

2.1.1 Type de couvert

Au Québec, on reconnaît trois types de couvert forestier dont la figure 2.1 illustre clairement la situation. Un peuplement est considéré comme feuillu, résineux ou mélangé selon l'importance des résineux dans sa composition. Nous nous intéressons dans ce travail au type de couvert « peuplement mélangé ». Pour le désigner comme tel, un peuplement doit contenir à la fois des tiges résineuses et des tiges feuillues. La surface terrière de chacun de ces groupes d'essences dans une placette donnée doit être supérieure à 25 % de celle de toutes les essences confondues, donc en corollaire, elle ne peut dépasser 75 %. On doit consulter Perron *et al.* (1994b) pour obtenir des informations supplémentaires concernant les schémas mentionnés dans la figure 2.1.

2.1.2 Groupement d'essences

D'après Perron *et al.* (1994b), le groupement d'essences décrit la composition d'un peuplement déterminé par les pourcentages de la surface terrière respectivement occupée par les principales essences ou groupes d'essences. Lors du calcul de la surface terrière, on considère uniquement les arbres vivants; on exclut les vétérans s'ils constituent moins de 25 % du couvert forestier. En pratique, ce pourcentage est estimé en tenant compte de la densité du couvert sur une photographie aérienne et non à partir de la surface terrière réelle du peuplement.

Sur la figure 2.2 qui concerne la bétulaie jaune à résineux à prédominance résineuse, on constate qu'elle est subdivisée en huit désignations différentes. L'appellation est formée par l'abréviation de l'essence résineuse principale, par exemple (Pu) pour la pruche du Canada, suivie de celle du bouleau jaune (Bj). La figure 2.3 fournit des informations semblables pour la bétulaie jaune à résineux à prédominance feuillue. On y retrouve également huit désignations. Dans ce cas, c'est l'abréviation de l'essence feuillue principale (Bj) qui est placée en début et suivie de celle de l'essence résineuse principale. Les noms latins des essences sont indiqués dans le tableau 2.7.

D'après le tableau 2.1, le groupement d'essences étudié occupe une superficie de 7 898 kilomètres carrés. Ce territoire a été réparti par les photointerprètes du MRN en peuplements jeunes et en peuplements mûrs. Ces derniers sont de loin les plus importants car ils représentent plus de 93 % du territoire occupé par la bétulaie jaune à résineux.

2.1.3 Perturbations sylvicoles non étudiées

Les peuplements de bouleau jaune à résineux sont, depuis plusieurs décennies, soumis à un régime forestier qui va de la coupe jardinatoire à la coupe totale. Parfois, les conditions d'isolement ont épargné des peuplements qui peuvent être considérés comme étant vierges.

Dans le présent travail, nous nous concentrons sur les placettes n'ayant pas connu de coupes importantes une vingtaine d'années avant l'installation de la placette-échantillon permanente et durant au moins une période d'observation. Une coupe est qualifiée d'importante si elle réduit la surface terrière de plus de 25 %. L'évolution des placettes soumises à un régime de coupes importantes sera étudiée dans un prochain projet de recherche.

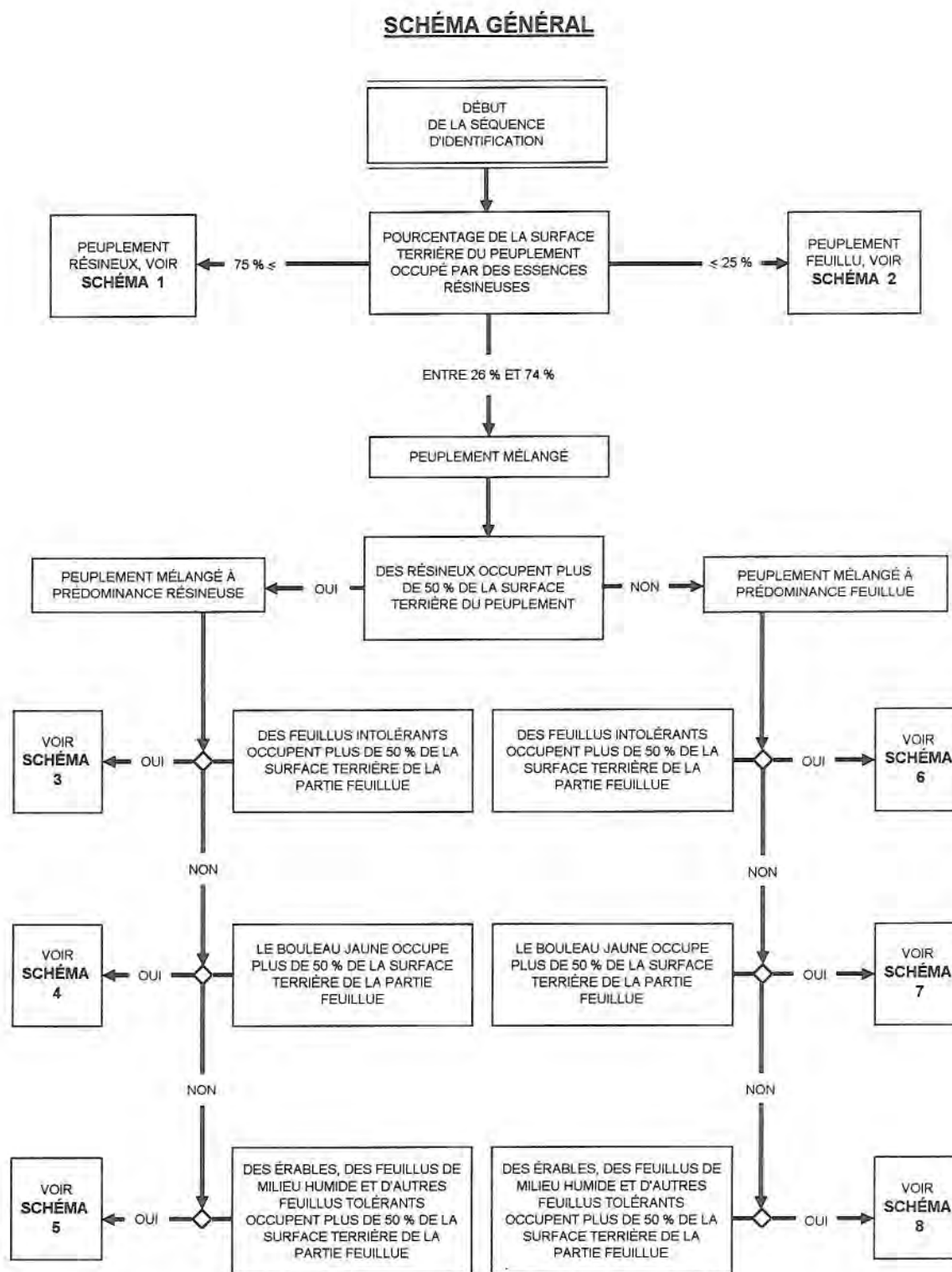


Figure 2.1. Schéma général des types de couvert et introduction aux groupements d'essences (Perron *et al.* 1994b).

SCHÉMA 4

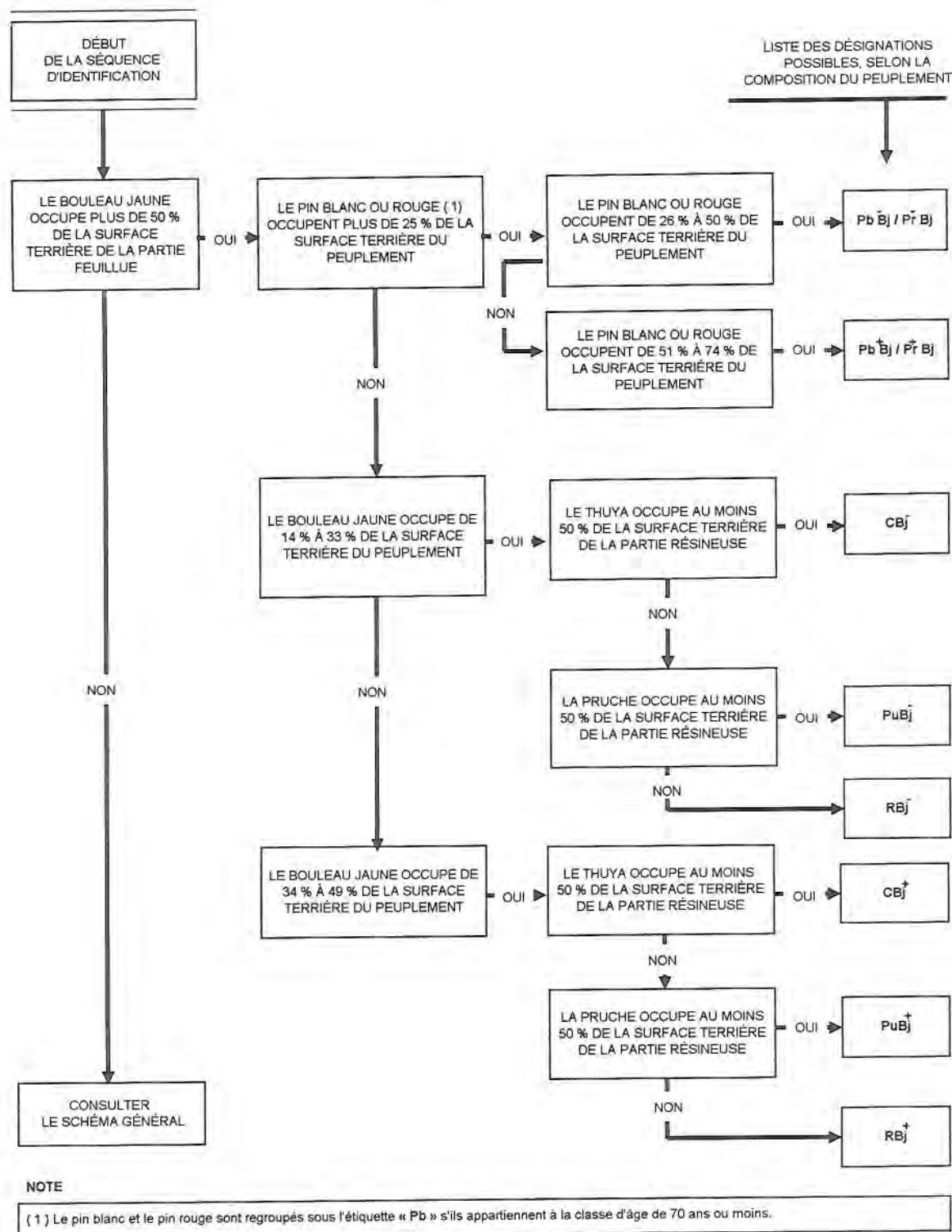


Figure 2.2. Groupements d'essences dans les peuplements mélangés à prédominance résineuse dont la partie feuillue est composée principalement de bouleau jaune (Perron *et al.* 1994b).

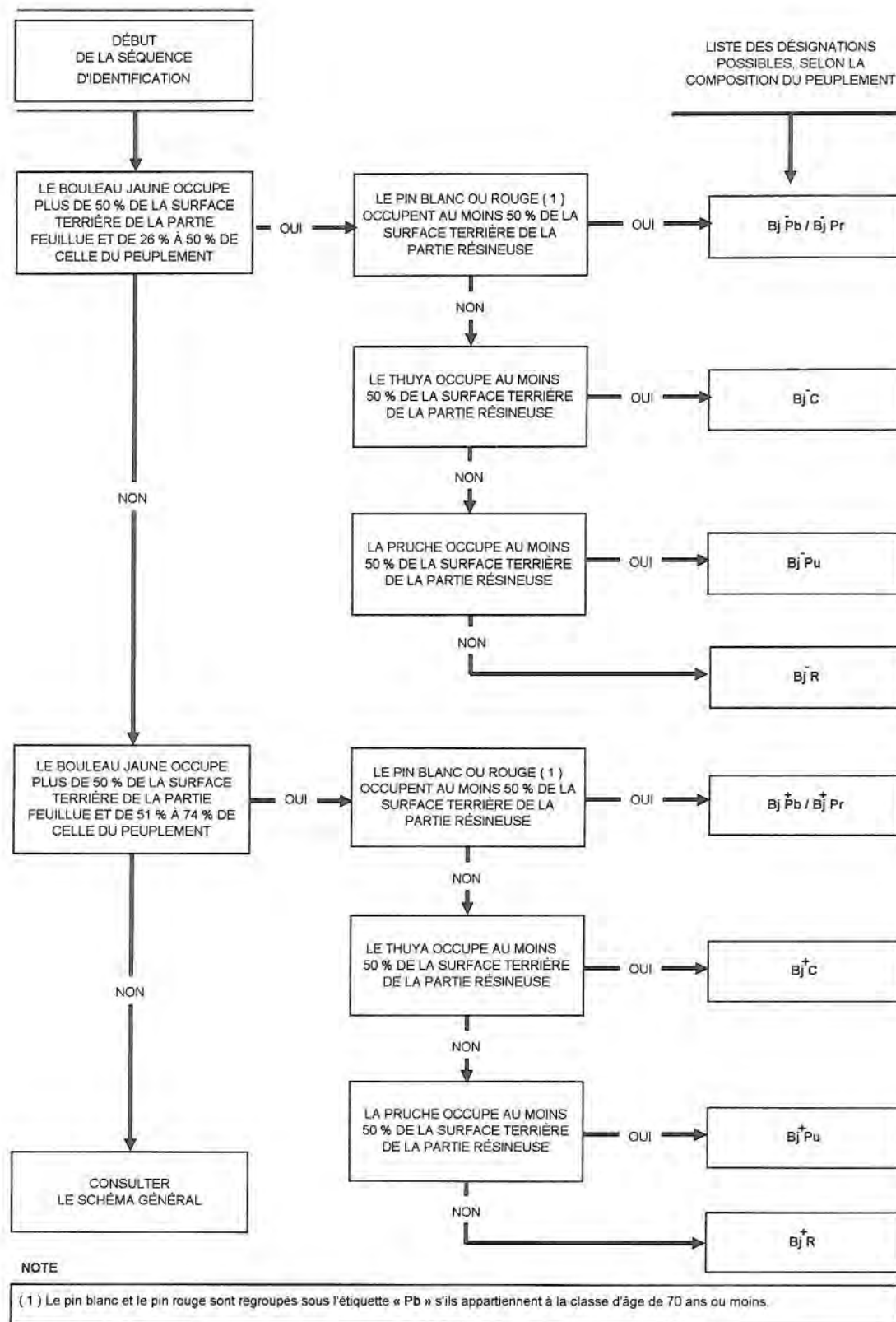


Figure 2.3. Groupements d'essences dans les peuplements mélangés à prédominance feuillue dont la partie feuillue est composée principalement de bouleau jaune (Perron *et al.* 1994).

Tableau 2.1. Superficie (km²) des groupements d'essences pour les peuplements jeunes et mûrs des forêts publiques

Groupements d'essences	Peuplements jeunes			Peuplements mûrs			Total
	Superficie	% ¹	% ²	Superficie	% ¹	% ²	Superficie
Cédrière	29	0	0	265	0	0	294
Pessière	31 550	53	32	162 655	83	65	194 205
Prucheraie	0	0	0	137	0	0	137
Pinède	280	1	0	586	0	0	866
Pineraie	11 253	19	12	2 832	1	1	14 085
Sapinière	16 310	27	17	31 049	16	12	47 359
Total Résineux	59 422	100	61	197 524	100	78	256 946
Érablière à résineux	329	1	0	1 208	3	0	1 537
Bétulaie blanche à résineux	587	3	1	15 279	41	6	15 866
Bétulaie jaune à résineux	531	2	1	7 367	20	3	7 898
Feuillus de lumière à résineux	21 909	93	22	11 545	31	5	33 454
Tremblaie à résineux	81	0	0	1 226	3	1	1 307
Mélangés sur stations sèches et humides	329	1	0	590	2	0	919
Total Mélangés	23 766	100	24	37 215	100	15	60 981
Bétulaie blanche	585	4	1	1 835	10	1	2 420
Bétulaie jaune	37	0	0	1 826	10	1	1 863
Érablière	837	6	1	1 850	10	1	2 687
Érablière à bouleau jaune	354	2	0	4 537	26	2	4 891
Érablière à feuillus de lumière	860	6	1	701	4	0	1 561
Érablière à feuillus d'ombre	340	2	0	2 114	12	1	2 454
Feuillus de lumière	11 658	79	12	4 122	23	1	15 780
Tremblaie	146	1	0	580	3	0	726
Feuillus sur stations sèches et humides	64	0	0	155	1	0	219
Total Feuillus	14 881	100	15	17 720	100	7	32 601
Total global	98 069		100	252 459		100	350 528

¹ Pourcentage par rapport au type de couvert.² Pourcentage par rapport à l'ensemble des trois types de couvert, appelé Total global.

Service des techniques d'aménagement, 1984-02.

Note de l'éditeur. Les expressions « feuillus tolérants » (FT) et feuillus intolérants » (FI) (*sic*) sont imprécises et discutables du point de vue de la langue française; nous les avons remplacées ici par les expressions consacrées « feuillus d'ombre » et « feuillus de lumière », qui ne demandent pas d'explication...

Tableau 2.2. Caractéristiques climatiques des régions écologiques du Québec méridional (Wilson 1971)

Domaine écologique	Sous-domaine écologique	Région écologique ¹	Température moyenne annuelle (°C)	Degrés-jours de croissance	Longueur saison croissance (jours)	Précipitations totales (mm)	Fraction nivale (%)
ERS-CAR	—	1a	6,0	> 3 400	> 190	950	25
ERS-TIL	Ouest	2a	4,5 à 6,0	2 800 à 3 400	180 à 190	< 1 000	25
	Est	2b 2d				> 1 000	
ERS-BOJ	Ouest	3h	2,5 à 4,5	2 400 à 2 800	170 à 180	< 1 000	25-30
	Est	3g 3e				> 1 000	
SAB-BOJ	Ouest	7a1 7a2 7a3 6a	2,5	2 200 à 2 400	160 à 170	900 à 1 100	30
	Est	6c 5a 5c 4c					
SAB-BOP	Ouest	8c1 8c2 8i 8h	0 à 2,0	2 000 à 2 200	150 à 160	< 1 000	25
	Est	8f 8l 8b 10a		1 800 à 2 200		> 1 000	30
EPN/m	Ouest	10b 12a 12c 12b1 12b2 12d1 12d2	0 à -3,0	1 600 à 2 000	140 à 150	< 1 000	30
	Est	11a ² 12e ² 11b ² 12f ²		1 400 à 1 600	< 140	> 1 000	40
		9d ³ 11a1 ³ 9b ³		1 600	< 140	> 1 000 > 1 100 > 1 300	

¹ La numérotation n'est pas continue puisqu'elle constitue une synthèse de Thibault (1985).

² Étage moyen.

³ Étage supérieur (montagnard).

Dans le cas des placettes ayant été affectées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE, *Choristoneura fumiferana* Clem.), nous rejetons celles dans lesquelles on observe que la mortalité survient d'une manière importante. Une mortalité est jugée importante si, pour une mesure donnée, la surface terrière de la partie résineuse d'une placette est réduite de plus de 25 %.

2.2 Sommaire des caractéristiques écologiques du territoire étudié

Les peuplements que le SIF classifie comme « Bétulaie jaune à résineux » croissent dans un territoire borné au sud par le domaine écologique de l'érablière à tilleul et au nord par le domaine de la sapinière à bouleau blanc. Ce territoire appartient aux deux domaines écologiques suivants : l'érablière à bouleau jaune et la sapinière à bouleau jaune. Les peuplements qui nous intéressent occupent des niches très spécifiques du domaine de l'érablière à bouleau jaune; ils se retrouvent principalement dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune.

2.2.1 Domaine de l'érablière à bouleau jaune

Ce domaine bénéficie de conditions climatiques plus clémentes par rapport à celles qui prévalent dans l'ensemble du Québec forestier méridional. D'après le tableau 2.2 extrait des données publiées par Wilson (1971), la température moyenne annuelle varie de 2,5 à 4,5 °C. Le nombre de degrés-jours de croissance varie de 2 400 à 2 800, et la longueur de la saison de croissance s'étend de 170 à 180 jours. Les précipitations totales sont de l'ordre de 1 000 mm dont 25 à 30 % tombent sous forme de neige.

Ce domaine occupe un territoire de 65 630 km²; il comprend des conditions écologiques variables et des stades d'évolution différents. Au tableau 2.3 produit par Grondin *et al.* (1995), on retrouve 26 communautés végétales correspondant à des combinaisons spécifiques de ces conditions. Dans ce travail, notre intérêt se porte sur seulement quatre communautés végétales :

1. sapinière à bouleau jaune
2. bétulaie jaune à sapin
3. sapinière à bouleau jaune et thuya
4. bétulaie jaune à sapin et thuya.

*

2.2.2 Domaine de la sapinière à bouleau jaune

Les conditions climatiques qui prévalent dans ce domaine sont clémentes mais légèrement inférieures à celles dont bénéficie le domaine de l'érablière à bouleau jaune. En effet, comme l'indique le tableau 2.2, la température moyenne annuelle se situe à 2,5 °C; le nombre de degrés-jours de croissance varie de 2 200 à 2 400 et la longueur de la saison de croissance varie de 160 à 170 jours. Pour les précipitations totales, ce domaine n'est pas désavantagé par rapport au précédent car elles varient de 900 à 1 100 mm dont 30 % tombent sous forme de neige. Il faut cependant noter que l'on observe un gradient décroissant de précipitations de l'est vers l'ouest. Le climat devient continental en s'éloignant de la mer.

Le domaine de la sapinière à bouleau jaune occupe un territoire de 94 768 km² : il comprend des conditions écologiques variables et des stades différents d'évolution. Ainsi d'après le tableau 2.4 produit par Grondin *et al.* (1995), 22 communautés végétales s'y retrouvent. Dans le travail actuel, seulement quatre de celles-ci nous intéressent :

1. bétulaie jaune à sapin
2. sapinière à bouleau jaune
3. bétulaie jaune à sapin et thuya
4. sapinière à bouleau jaune et thuya.

Grondin *et al.* (1995) ont cartographié un territoire où on retrouve principalement les bétulaies jaunes à résineux : ils l'ont désigné « Domaine écologique, sapinière à bouleau jaune ». Ils ont, par la suite, scindé ce territoire en deux sous-domaines écologiques Ouest et Est, dont les superficies respectives sont de 64 262 et 30 506 km² (tableau 2.5). Sur la carte écologique apparaissant à la figure 2.4, le sous-domaine « Ouest » comprend les régions écologiques 7a1, 7a2, 7a3 et 6a. Également, le sous-domaine « Est » est réparti en quatre régions écologiques : 6c, 5a, 5c et 4c. Sur le tableau 2.5, on peut retrouver les superficies de chacune de ces régions de même que celles des autres unités écologiques du territoire forestier québécois méridional.

*

Tableau 2.3. Classification écologique du domaine de l'érablière à bouleau jaune (Grondin *et al.* 1995)

Milieu écologique	Situation	Type de peuplement
Milieus mésiques	De mi-pente et de sommet	Érablière à bouleau jaune typique Érablière à bouleau jaune et tilleul Érablière à bouleau jaune et hêtre Érablière à bouleau jaune, tilleul et hêtre Érablière à ostryer
	En bas de pente	Prucheraie à bouleau jaune Sapinière à bouleau jaune Bétulaie jaune à sapin Sapinière à bouleau jaune et thuya Bétulaie jaune à sapin et thuya
	De terrain plat	Sapinière à thuya et pin blanc Sapinière à épinette blanche et pin blanc Sapinière à épinette rouge
Milieus xériques	Sur roc ou till très mince	Sapinière à thuya et pin blanc Sapinière à épinette rouge et thuya
	Sur sable	Pessière noire à sapin et éricacées
Milieus hydriques	Ombrotrophes	Sapinière à épinette rouge et sphaignes
	Minérotrophes	Érablière à bouleau jaune et frêne noir Érablière à bouleau jaune, tilleul et frêne noir Sapinière à thuya Bétulaie jaune à frêne noir Frênaie noire à orme
Milieus organiques	Ombrotrophes	Pessière noire à sphaignes Pessière noire à éricacées
	Minérotrophes	Pessière noire à némopanthé Cédrière à sapin
Rives, marais, marécages et eaux peu profondes		

2.2.3 Stabilité des peuplements

Les bétulaies jaunes à résineux sont des peuplements climaciques qui se régénèrent directement sans passer par des stades intermédiaires lorsqu'ils sont épargnés de perturbations majeures. Leur composition en espèces se trouve parfois radicalement modifiée par les perturbations suivantes :

1. Coupes à diamètre limite
2. Coupes jardinatoires
3. Coupes totales
4. Épidémies légères de la tordeuse des bourgeons de l'épinette
5. Épidémies sévères de la tordeuse des bourgeons de l'épinette
6. Chablis partiel
7. Chablis total
8. Feux de forêts.

Il est important de souligner que certains de ces peuplements ont été modifiés par les passages successifs de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.). D'après Blais (1983), des épidémies ont été signalées vers 1802, 1877, 1911 et au cours des périodes 1940-49 et 1967-72.

2.3 Placettes-échantillons permanentes, provenance et caractéristiques

2.3.1 Situation initiale

Au cours du premier programme d'inventaire forestier (1970 à 1977), le service des inventaires forestiers (SIF) a établi un réseau québécois de 7 155 placettes-échantillons permanentes (PEP). D'après Bard *et al.* (1975), les PEP représentent des unités de sondage dans lesquelles les changements physiques et écologiques sont suivis. Leur caractère permanent permet, par comparaison de mesures successives, de suivre l'évolution des peuplements forestiers, leur comportement en divers milieux et leur réaction à diverses perturbations d'origine humaine, biologique ou physique. La forêt reste un complexe biologique en perpétuel changement, dont les interactions sont reflétées par la composition des peuplements, leur croissance, leur reproduction, la litière et le sol. L'analyse de l'effet des facteurs en interaction doit être conduite à partir des mesures précises et périodiques d'un ensemble d'échantillons représentatifs.

Le remesurage de ces PEP s'effectue depuis 1978. Au début de ce travail, tous les remesurages effectués avant 1990 étaient disponibles. Nous y avons ajouté le remesurage de 94 placettes que nous avons ensuite réalisé spécifiquement pour améliorer la qualité de ce travail.

2.3.2 Réseau des placettes-échantillons permanentes

En 1969 et 1970, des experts en foresterie ont été mandatés pour étudier tout le système des inventaires forestiers au Québec. Pour le sondage permanent, on s'est inspiré du rapport de Lafond et Ladouceur (1968) qui subdivise la forêt commerciale du Québec en six zones climatiques et vingt zones biogéographiques. Cependant, le comité a retenu seulement trois entités géographiques principales, dans le but de déterminer le nombre de placettes permanentes qu'il était nécessaire d'établir. Dans chacune des entités, on retrouve des peuplements ayant en commun certaines caractéristiques écologiques précises. Ces trois zones décrites à la figure 2.5, ont été appelées « régions forestières ». En tenant compte de la diversité des peuplements présents dans chaque région et des buts poursuivis par la mise en place des placettes-échantillons permanentes, le comité a convenu que la taille d'échantillonnage devait être spécifique à chacune des régions forestières.

Dans le tableau 2.6, les régions « Sapinière mélangée » et « Feuillus », qui nous intéressent plus particulièrement, sont respectivement 2,5 et 10 fois plus intensément échantillonnées que la région forestière appelée « Pessière ». Plus tard, cette représentation initiale a été modifiée par l'installation de 1 455 nouvelles placettes.

2.3.3 Localisation des placettes-échantillons permanentes retenues

Pour chaque strate, l'emplacement exact d'une grappe de deux placettes est aléatoirement choisi avec un tirage à deux degrés sans remise. Les unités primaires sont les feuillets des cartes forestières tandis que les unités secondaires sont toutes les intersections des lignes de latitude et de longitude en minutes. Le numéro de feuillet est d'abord tiré au hasard et ensuite, l'intersection. Le point ainsi choisi devient le centre de la placette primaire d'une grappe. Le coût des observations est diminué en localisant les placettes par grappe de deux. Les placettes sont réparties sur le territoire par grappe, une placette principale et une placette satellite, et l'ensemble se nomme « virée ». La placette satellite est distante de 425 mètres de la placette principale. Son orientation par rapport à la placette primaire est également aléatoire. On procède au tirage d'un chiffre de 1 à 10 et on le multiplie par

Tableau 2.4. Classification écologique du domaine de la sapinière à bouleau jaune (Grondin *et al.* 1995)

Milieu écologique	Situation	Type de peuplement
Milieux mésiques	De mi-pente et de sommet	Bétulaie jaune à sapin Sapinière à bouleau jaune
	En bas de pente	Bétulaie jaune à sapin et thuya Sapinière à bouleau jaune et thuya
	De terrain plat	Sapinière à bouleau blanc Sapinière à épinette rouge Sapinière à thuya
	De position topographique variée	Érablière à bouleau jaune Érablière à ostryer
	En position maritime	Sapinière à épinette blanche
Milieux xériques	Sur roc ou till très mince	Communautés résineuses
	Sur sable	Pessière noire à sapin Pessière noire à mousse
Milieux hydriques	Ombrotrophes	Pessière noire à sapin Sapinière à épinette rouge et sphaignes
	Minérotrophes	Sapinière à thuya Bétulaie jaune à frêne noir Frênaie noire à sapin Frênaie noire à orme
Milieux organiques	Ombrotrophes	Pessière noire à sphaignes
	Minérotrophes	Pessière noire à némopanthé Cédrière à sapin
Rives, marais, marécages et eaux peu profondes		

**Tableau 2.5. Répartition écologique de la superficie forestière du Québec méridional
(Grondin *et al.* 1995)**

Zone de végétation	Superficie (%) km ²	Sous-zone	Superficie (%) km ²	Domaine écologique	Superficie (km ²)	Sous-domaine	Superficie km ²	Région	%	Superficie km ²
Tempérée Nordique	(14,25) 110 792			Érablière à caryer	9 694		9 694	1a	1,25	9 694
				Érablière à tilleul	35 468	Ouest	7 698	2a	0,99	7 698
								2b	2,66	20 642
						Est	27 770	2d	0,92	7 128
				Érablière à bouleau jaune	65 630	Ouest	31 418	3h	4,04	31 418
						Est	34 212	3g	2,13	16 536
Boréale	(85,75) 666 689	Inférieure	(28,08) 218 504	Sapinière à bouleau jaune	94 768	Ouest	64 262	7a1	0,73	5 702
								7a2	3,59	27 883
								7a3	3,05	23 721
						Est	30 506	6a	0,90	6 956
								6c	0,92	7 128
								5a	1,83	14 198
						Ouest	74 926	5c	0,51	3 934
								4c	0,67	5 246
								8c1	3,42	26 629
						Est	48 810	8c2	2,08	16 137
								8i	1,48	11 518
								8h	2,65	20 642
				Sapinière à bouleau blanc	123 736	Ouest	196 723	8f	1,58	12 316
								8l	1,94	15 054
								8b	1,75	13 628
						Est	236 922	10a	1,00	7 812
								10b	0,67	5 189
								12a	2,80	21 782
						Ouest	14 540	12c	5,21	40 485
								12b1	4,37	33 984
								12b2	2,42	18 817
								12d1	6,13	47 670
								12d2	3,70	28 796
						Est	236 922	11a2	6,18	48 069
								12e	5,61	43 621
								11b	3,27	25 431
						Ouest	14 540	12f	5,01	38 945
								9d	6,30	48 981
								11a1	3,35	26 059
		Supérieure	(57,67) 448 185	Pessière noire à mousse	433 645	Est	236 922	9b	0,75	5 816
				Toundra	14 540		14 540	14a	1,87	14 540
									100	777 481

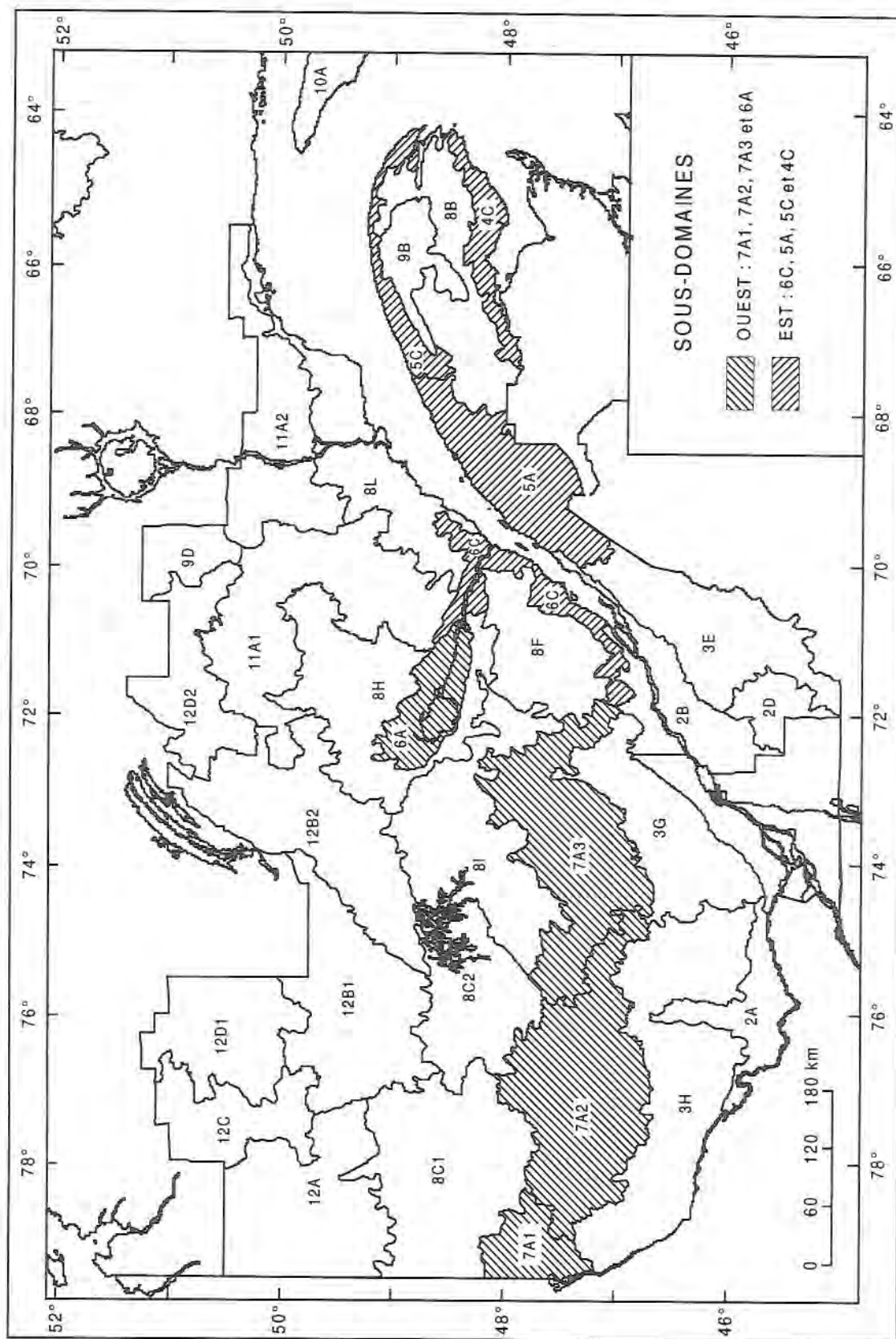


Figure 2.4. Localisation du domaine écologique de la sapinière à bouleau jaune (Grondin *et al.* 1995).

Tableau 2.6. Intensité d'échantillonnage pour chaque région forestière

Région forestière	Superficie représentée par une placette		Fraction d'échantillonnage	Nombre de placettes permanentes
	<i>milles</i> ²	km ²		
Feuillus	10	26	0,0000153	3 400
Sapinière mélangée	40	104	0,0000038	1 300
Pessière	100	259	0,0000015	1 000

36\$. On obtient ainsi l'azimut par rapport au nord magnétique. Cet azimut est l'orientation du cheminement conduisant de la placette primaire vers la placette satellite.

La grande majorité des placettes permanentes présentent une composition en essences ou bien, elles sont soumises à des perturbations (épidémies ou coupes partielles), ce qui les excluent de la présente étude qui est très spécifique.

Sur la figure 2.6, on peut voir la localisation approximative de chacune des 101 placettes retenues. On y constate une distribution géographique non uniforme des placettes reliée aux conditions écologiques qui sont également non uniformes.

2.3.4 Forme et dimensions des placettes

Lors de l'établissement des placettes, les mesures étaient prises selon le système impérial. Par la suite, la conversion a été effectuée au système métrique. Au premier mesurage, une placette permanente correspondait à la projection au sol d'un plan horizontal circulaire de 37,24 pieds (11,34 m) de rayon, soit exactement 0,1 acre de superficie. Au moment de la deuxième mesure, pour passer au système métrique, on a réduit le rayon des placettes de 11,34 à 11,28 mètres, pour obtenir exactement une superficie de 0,04 ha. En pratique, il a fallu exclure de chaque placette un petit nombre d'arbres qui n'appartenait plus à la placette conséquemment à la légère réduction de la superficie. Les fichiers correspondant au premier mesurage ont également été corrigés.

Chacune des placettes est constituée de deux sous-placettes concentriques, comme l'illustre la figure 2.7. La petite placette centrale d'une superficie de 0,004 ha sert uniquement au dénombrement diamétral des tiges d'essences commerciales mais encore au stade de gaulis. On y retrouve donc le nombre de tiges par essence pour chacune des classes de diamètre de

2, 4, 6 et 8 centimètres. La grande placette, d'une superficie de 0,04 hectare qui inclut celle de la placette centrale, sert principalement à étudier les caractéristiques dendrométriques des tiges marchandes dont le seuil de recensement est fixé à un diamètre de 9 cm.

2.3.5 Composition en essences des placettes

Dans les 101 placettes retenues, on dénombre 3 030 tiges marchandes vivantes à au moins l'une des quatre mesures potentiellement disponibles. Ces tiges sont réparties en 24 essences forestières.

Dans le tableau 2.7, on identifie chacune des essences par son nom latin, son nom français et par le sigle officiel utilisé au SIF. Ce sigle apparaîtra désormais dans le texte et dans les tableaux pour en alléger le contenu. Dans le tableau 2.8, il n'y a que deux essences principales : le bouleau jaune et le sapin baumier. Par contre, d'autres essences secondaires, tel l'érable à sucre, l'érable rouge, l'épinette blanche, l'épinette rouge, la pruche du Canada et le thuya occidental, sont importantes par leur longévité et par leurs dimensions généralement supérieures à celles atteintes par le sapin baumier. Sur ce tableau, quatorze essences apparaissent rarement ou encore n'ont aucune valeur commerciale; elles seront ignorées dans cette recherche.

2.3.6 Principales statistiques concernant les arbres des placettes-échantillons

Dans les 101 placettes retenues, les tiges sont identifiées individuellement afin de permettre de suivre leur évolution. D'après le tableau 2.9, à la mesure 1, le DHP quadratique moyen (DHQM) atteint 18,8 cm avec un écart type de 10,1 cm. On constate une forte variation du DHP des tiges entre le minimum à 9,0 cm et le maximum observé. Ce dernier a été mesuré sur une pruche du Canada dont le DHP approchait le mètre.

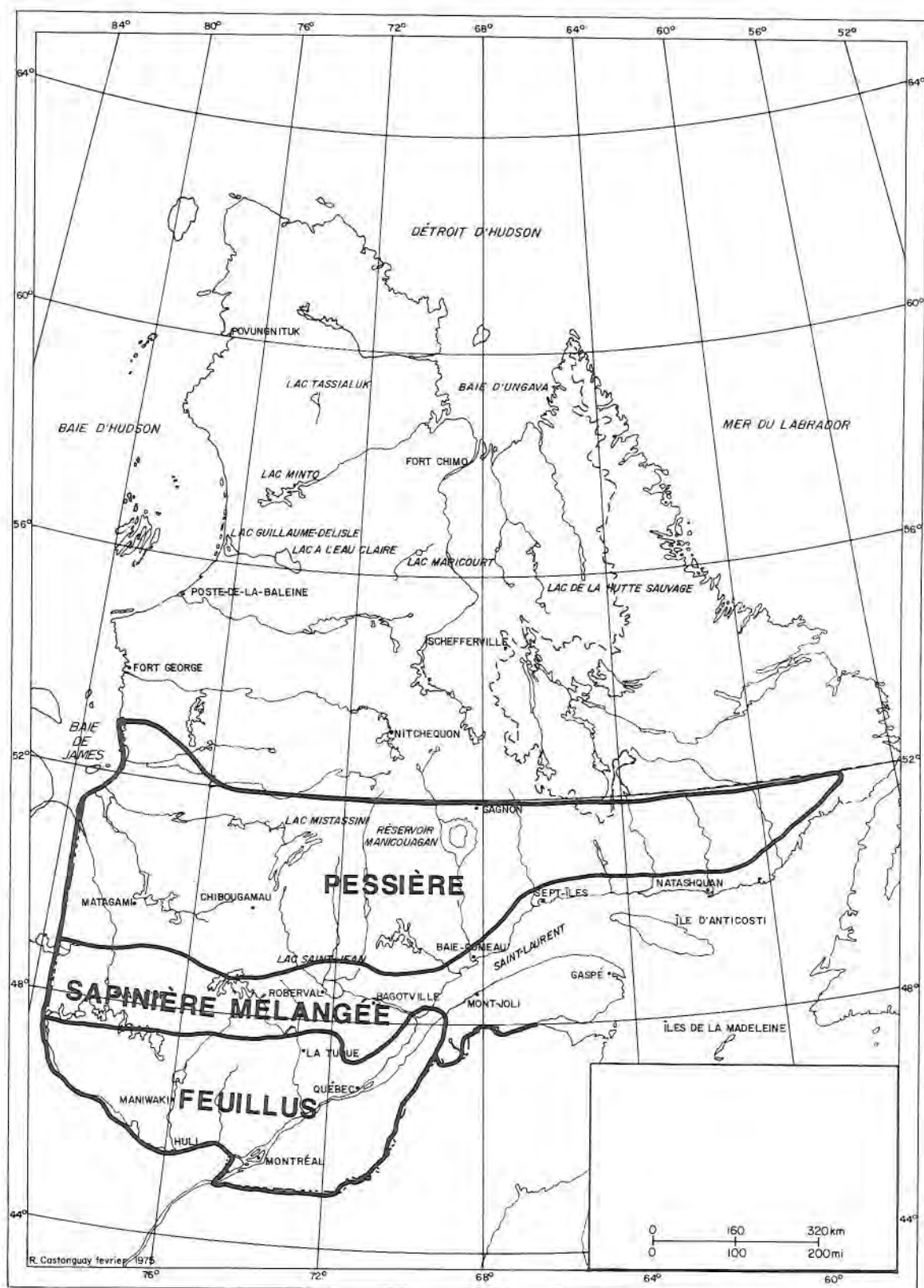


Figure 2.5. Régions forestières du Québec, d'après le Service des inventaires forestiers.

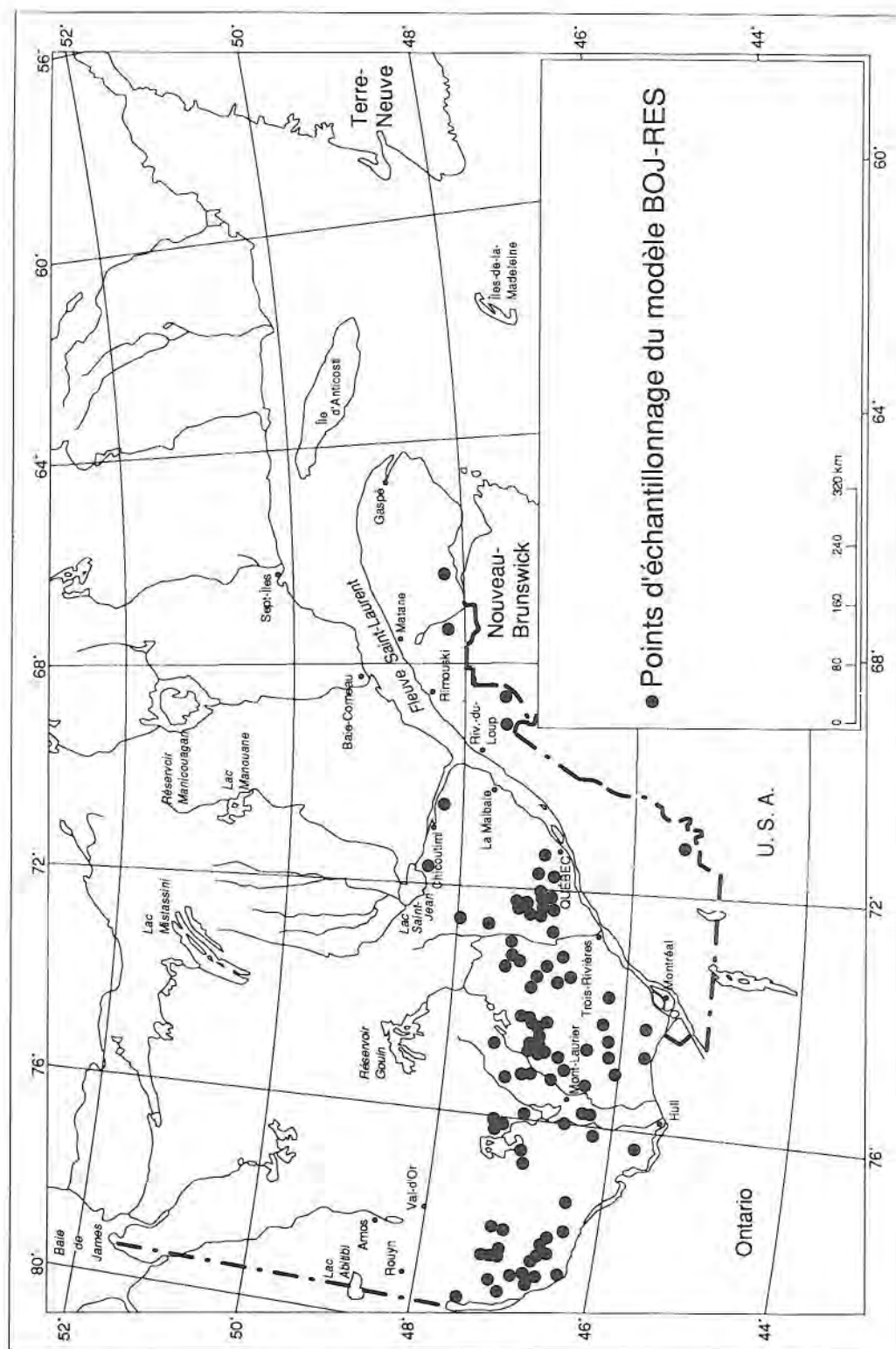


Figure 2.6. Localisation des placettes-échantillons permanentes concernant la bétulaie jaune à résineux.

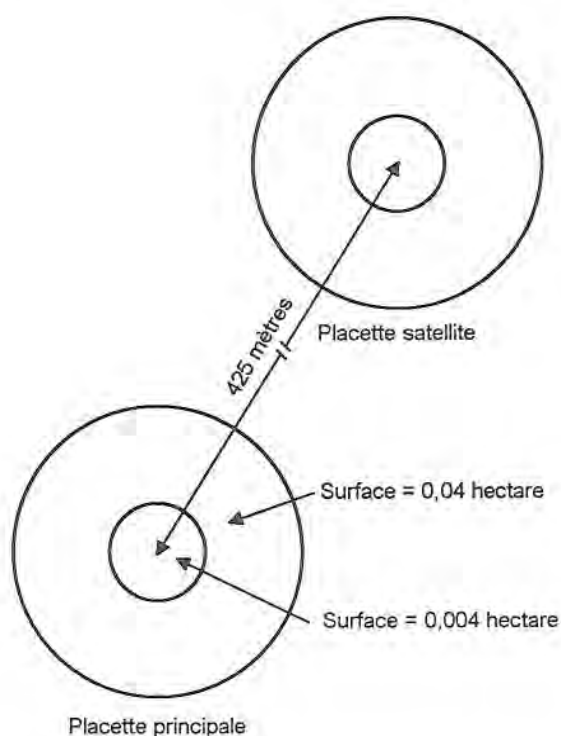


Figure 2.7. Schéma d'une grappe de placettes permanentes.

Au cours du temps, on peut constater que le DHPM croît de 0,5 et 0,6 cm respectivement pour les deux premières périodes d'observation. Il faut être prudent dans l'interprétation de ces augmentations puisqu'en mesure 2 et 3, des tiges recrues sont apparues, tandis que des tiges de toute dimension meurent, et sont exclues des présentes statistiques. De plus, il faut considérer qu'à la mesure 3, on a seulement 35 placettes remesurées sur les 101 placettes retenues initialement.

Contrairement au DHP, les variables ÂGE et HAUTEUR sont mesurées sur seulement certains individus de la placette (Perron *et al.* 1994b) que l'on peut qualifier d'arbres-échantillons. À la mesure 1, la hauteur moyenne des arbres-échantillons est estimée à 13,8 mètres avec un écart type de 4,1 mètres. Le plus petit arbre-échantillon mesure 4,0 mètres et le plus grand atteint 27,4 mètres. Pour la même mesure, l'âge moyen est estimé à 53,4 ans avec un écart type de 25,8 ans. Pour ces deux dernières variables, on peut constater au tableau 2.9 de très fortes augmentations avec le temps; il faut encore une fois interpréter avec prudence ces variations car en plus des deux explications déjà mentionnées, des modifications aux normes de sélection des arbres-échantillons sont survenues au fil des années.

2.3.7 Étude de la structure d'âge

En forêt mélangée, on affirme assez aisément que la placette est inéquienne et on la caractérise par sa seule distribution des tiges par classe de DHP.

Nous avons vu au paragraphe précédent que l'âge moyen à la mesure 1 pour l'ensemble des placettes est estimé à 53,4 ans, avec un coefficient de variation très élevé de 48,3 %. De plus, dans chacune des placettes, on peut observer une grande variation de l'âge des arbres témoins. La variation est tellement importante que l'on pourrait être tenté de décréter sans autre vérification que ces arbres proviennent de placettes dont la structure peut être qualifiée d'inéquienne. Pour en savoir davantage, nous avons sélectionné au hasard une placette située près du lac Laurier pour vérifier si l'on pouvait se fier à la distribution des tiges par classe de DHP pour estimer une distribution par classe d'âge. On peut retrouver les données concernant la placette « Laurier » dans le tableau 2.10. Contrairement à la procédure habituelle, nous avons sondé chaque arbre marchand pour connaître son âge réel. Ces âges ont été comptés en laboratoire à partir de carottes obtenues avec la tarière de Pressler. Le binoculaire a été utilisé pour éviter les erreurs lorsque les anneaux de croissance sont difficilement identifiables.

À partir des données contenues dans le tableau 2.10, nous avons compilé certaines statistiques concernant des attributs dendrométriques des tiges de la placette. Ces dernières sont présentées au tableau 2.11. Étant donné les valeurs fortes pour l'écart type et pour le coefficient de variation, on reste avec de forts doutes sur l'uniformité de certaines variables dendrométriques des tiges de la placette. Par trois histogrammes différents, nous étudions la régularité de la structure.

Distribution des tiges par classe de DHP

À la figure 2.8, on peut voir l'histogramme de fréquence des arbres par classe de DHP. Sur celui-ci, cinq tiges sont beaucoup plus grosses que les autres. Il n'y en a pourtant que deux qui sont beaucoup plus vieilles que les autres. Sur le tableau 2.10, on constate que trois tiges, dont les âges sont 73, 80 et 102 ans, ont atteint des dimensions semblables à celles des tiges bicentenaires. On peut soupçonner que les deux tiges les plus vieilles ont subi une période de suppression très longue en jeune âge ou encore stagnent depuis déjà très longtemps (environ une centaine d'années).

Tableau 2.7. Identification des 24 essences retrouvées dans les 101 placettes

Nom français	Nom scientifique	Sigle
Feuillus		
Bouleau à papier	<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	BOP
Bouleau jaune	<i>Betula alleghaniensis</i> Britt.	BOJ
Cerisier de Pennsylvanie	<i>Prunus pensylvanica</i> L.f.	PRP
Cerisier tardif	<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	CET
Érable à épis	<i>Acer spicatum</i> Lamb.	ERE
Érable à sucre	<i>Acer saccharum</i> Marsh.	ERS
Érable de Pennsylvanie	<i>Acer pensylvanicum</i> L.	ERP
Érable rouge	<i>Acer rubrum</i> L.	ERR
Frêne d'Amérique	<i>Fraxinus americana</i> L.	FRA
Frêne noir	<i>Fraxinus nigra</i> Marsh.	FRN
Hêtre à grandes feuilles	<i>Fagus grandifolia</i> Ehrh.	HEG
Orme d'Amérique	<i>Ulmus americana</i> L.	ORA
Orme de Thomas	<i>Ulmus thomasi</i> Sarg.	ORT
Peuplier faux-tremble	<i>Populus tremuloides</i> Michx.	PET
Saule <i>spp.</i>	<i>Salix spp.</i>	SAL
Sorbier d'Amérique	<i>Sorbus americana</i> Marsh.	SOA
Tilleul d'Amérique	<i>Tilia americana</i> L.	TIL
Résineux		
Épinette blanche	<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	EPB
Épinette noire	<i>Picea mariana</i> (Mill.) BSP	EPN
Épinette rouge	<i>Picea rubens</i> Sarg.	EPR
Pin blanc	<i>Pinus strobus</i> L.	PIB
Pruche du Canada	<i>Tsuga canadensis</i> (L.) Carrière	PRU
Sapin baumier	<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	SAB
Thuja occidentale	<i>Thuja occidentalis</i> L.	THO

On se trouve en présence de tiges appartenant à deux classes d'âge différentes, elles présentent pourtant une allure diamétrale assez semblable. Par contre, les autres tiges plus jeunes se retrouvent dans des classes de DHP plus faibles. Il est intéressant de constater que les coefficients de variation des données concernant l'âge et le DHP sont presque équivalents. Ils prennent respectivement les valeurs 67,9 et 57,2 %.

Dans un proche avenir, nous vérifierons avec d'autres placettes provenant de la bétulaie jaune à résineux si ce résultat reste constant. À ce moment, on pourrait estimer le coefficient de variation des âges, difficile à obtenir à partir de celui des DHP toujours disponible. On obtiendrait ainsi un critère de sélection facile à utiliser. Ce dernier devient essentiel si l'on désire traiter différemment des placettes selon leur structure équiennne ou inéquiennne.

★

Distribution des tiges par classe de hauteur

En examinant la figure 2.9, il est difficile d'affirmer que la population totale est un amalgame de deux sous-populations tout à fait différentes en terme de hauteur. C'était beaucoup plus évident avec les variables ÂGE et DHP. On constate que quatre tiges sont dominantes, quatre sont codominantes, neuf peuvent être classées comme intermédiaires et les quatre dernières sont opprimées.

Distribution des tiges par classe d'âge

Nous avons distribué les 22 tiges de la placette « Laurier » en 12 classes d'âge à la figure 2.10. Nous constatons que deux tiges de bouleaux jaunes sont beaucoup plus vieilles que les autres, leurs âges ayant été comptés à 179 et 218 ans. On y retrouve une épinette blanche de 102 ans, un sapin baumier de 84 ans, trois bouleaux jaunes dont les âges sont assez rapprochés : 73, 75 et 80 ans. Ensuite, on retrouve seulement des conifères dont l'âge varie de 33 à 70 ans. Pour l'ensemble, nous obtenons un âge moyen de 68,23 ans, un écart type de 45,26 ans et un coefficient de variation de 67,9 %.

Tableau 2.8 Répartition de l'effectif total en nombre de tiges entre les différentes essences, toutes placettes et toutes mesures confondues

NO	ESSENCE	NOMBRE DE TIGES	IMPORTANCE EN POURCENTAGE
1	SAB	1092	36.04
2	BOJ	750	24.75
3	THO	236	7.79
4	BOP	213	7.03
5	ERR	165	5.45
6	EPB	130	4.29
7	ERS	111	3.66
8	PRU	72	2.38
9	EPR	66	2.18
10	PRP	51	1.68
11	FRN	35	1.16
12	ERP	35	1.16
13	EPN	29	0.96
14	ERE	11	0.36
15	HEG	10	0.33
16	SOA	8	0.26
17	TIL	5	0.17
18	PET	3	0.10
19	CET	2	0.07
20	FRA	2	0.07
21	PIB	1	0.03
22	ORA	1	0.03
23	SAL	1	0.03
24	ORT	1	0.03
TOTAL		3030	100.00

Tableau 2.9 Principales statistiques individuelles pour les 101 placettes et pour toutes les essences confondues

VARIABLE	MESURE	NOMBRE	MOYENNE	ECART TYPE	CV	MINIMUM	MAXIMUM
AGE (années)	1	312	53.4	25.8	48.3	17.0	215.0
AGE (années)	2	308	67.7	30.2	44.6	19.0	222.0
AGE (années)	3	141	90.4	51.2	56.6	27.0	290.0
HAUTEUR (m)	1	507	13.8	4.1	29.6	4.0	27.4
HAUTEUR (m)	2	664	15.2	3.9	26.0	4.6	27.5
HAUTEUR (m)	3	415	15.7	4.3	27.3	1.4	26.3
DHP (cm)	1	2586	18.8	10.1	54.1	9.0	86.9
DHP (cm)	2	2910	19.3	10.2	53.0	9.0	86.9
DHP (cm)	3	902	19.9	10.1	51.0	9.0	71.5

Tableau 2.10. Description dendrométrique de la placette « Laurier »

Essence	N° de l'arbre	Hauteur (m)	Âge (années)	DHP (mm)
EPB	1	14,4	102	337
BOJ	2	14,4	75	172
BOJ	3	14,9	73	324
BOJ	4	17,3	179	419
BOJ	5	16,6	80	397
BOJ	10	16,8	218	403
SAB	14	11,6	38	135
SAB	15	12,0	54	162
SAB	16	16,3	58	211
SAB	17	13,3	45	198
EPN	18	4,6	70	111
SAB	19	11,7	33	152
SAB	20	11,5	50	168
SAB	22	9,17	39	110
SAB	23	10,7	38	118
SAB	24	8,4	51	118
SAB	25	8,9	84	138
SAB	26	10,8	38	117
SAB	27	10,0	36	104
SAB	28	10,8	50	108
SAB	29	9,9	40	94
SAB	30	8,7	40	98

Sans risque de se tromper, on peut qualifier cette placette d'inéquienne, ou encore de multi âgée. Les régressions des variables dendrométriques en fonction de l'âge ont peu de chance d'être significatives.

2.3.8 Étude de la stabilité temporelle du mélange feuillus-résineux

Le modèle de projection du rendement *BOJRES* est conçu pour s'appliquer à toutes sortes de bétulaies jaunes à résineux. Tel que nous l'avons vu à la section 2.1, ce type de peuplement mélangé est bien défini selon la composition en bouleau jaune. Par contre, il tolère la présence de toute une gamme d'essences résineuses. Il faut mentionner qu'en fonction des perturbations et de la croissance spécifique de chacune des tiges, la composition relative en espèces peut se modifier considérablement.

Au tableau 2.12, on peut voir l'évolution de la surface terrière marchande de la cohorte feuillue pour les 52 premières placettes. Dans ce tableau et le suivant, les chiffres 0,000 signifient « valeurs manquantes ». La différence entre la mesure 1 et la mesure 2 est positive dans le cas de 35 de ces placettes. Globalement, pour les 101 placettes, la surface terrière moyenne de la cohorte feuillue est passée successivement de 0,458 à 0,486, à 0,600 et à 0,874 mètre carré par placette pour les mesures 1, 2, 3 et 4. Les estimés de la moyenne des mesures 3 et surtout 4 sont cependant peu significatifs : les données sont disponibles pour respectivement 44 et 7 placettes.

Au tableau 2.13, on retrouve une information semblable à celle observée au tableau 2.12, sauf que l'on s'intéresse à la cohorte résineuse. L'évolution de la

Tableau 2.11. Caractéristiques dendrométriques des arbres de la placette « Laurier »

Variable	Moyenne	Écart type	Coefficient de variation	Minimum	Maximum
Âge (ans)	68,23	45,26	67,9 %	33	218
Hauteur (m)	11,95	3,18	27,3 %	4,6	17,3
DHP (cm)	19,06	10,65	57,2 %	9,4	41,9

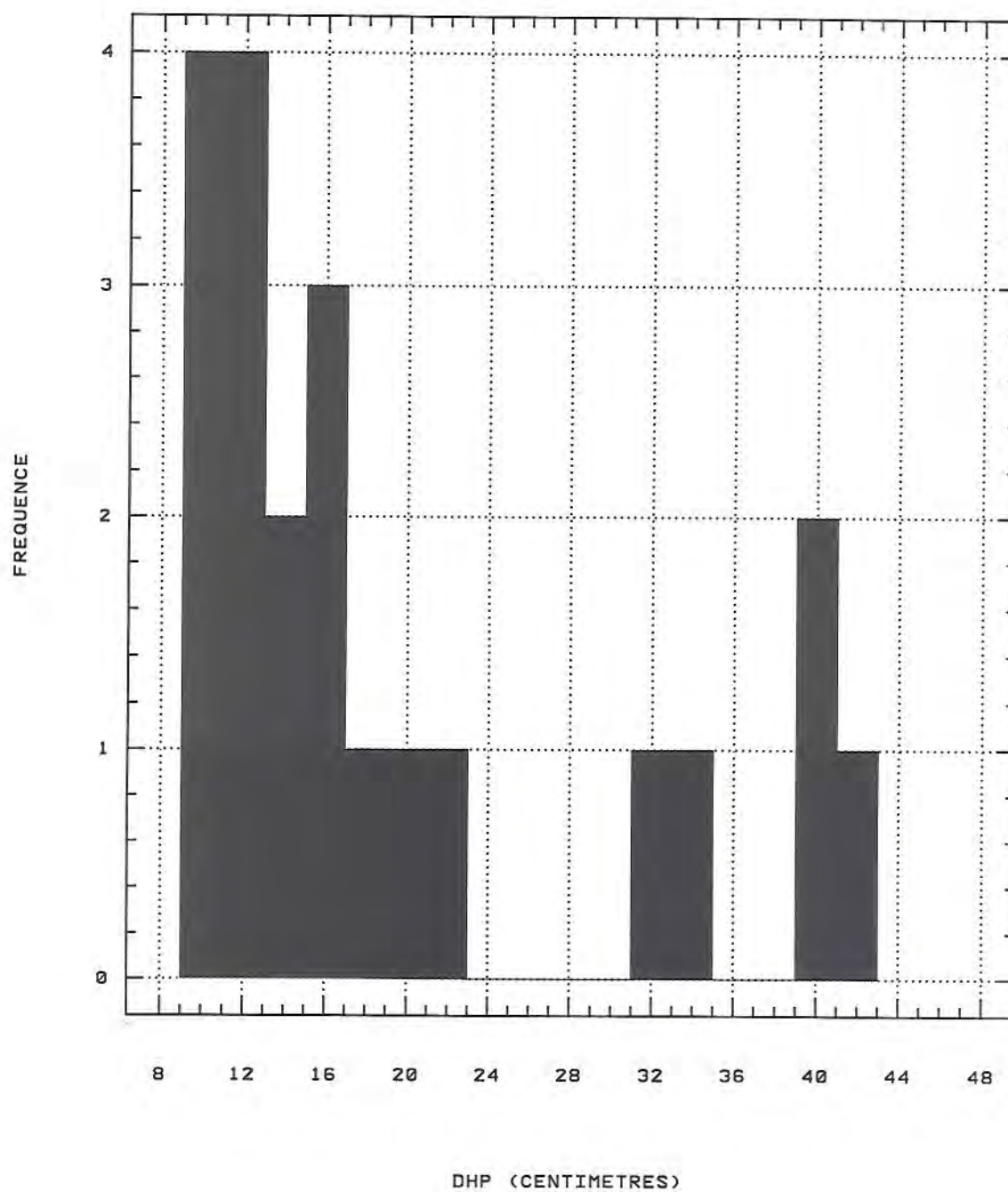


Figure 2.8. Histogramme de fréquence des tiges de la placette « Laurier » par classe de DHP.

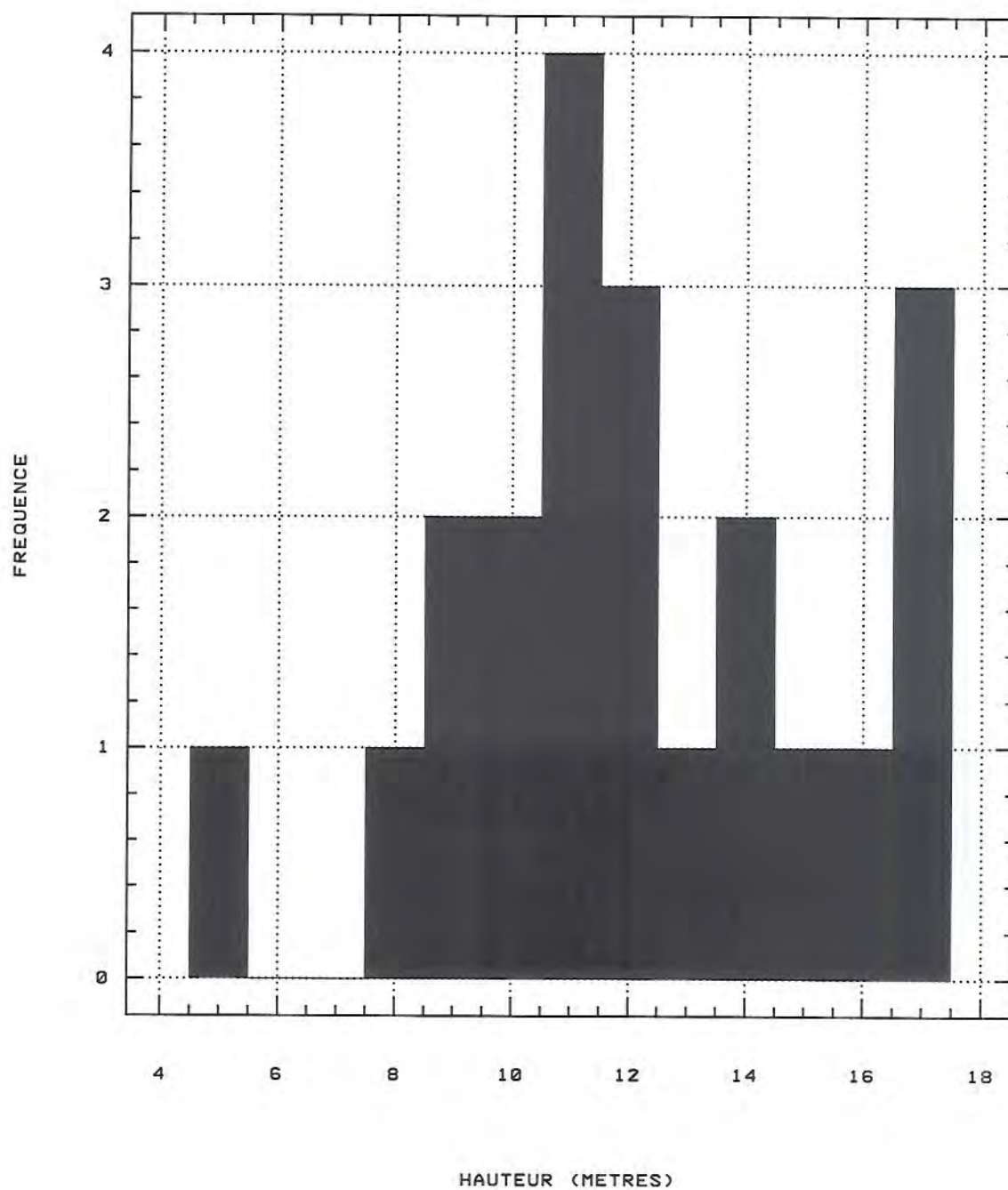


Figure 2.9. Histogramme de fréquence des tiges de la placette « Laurier » par classe de hauteur.

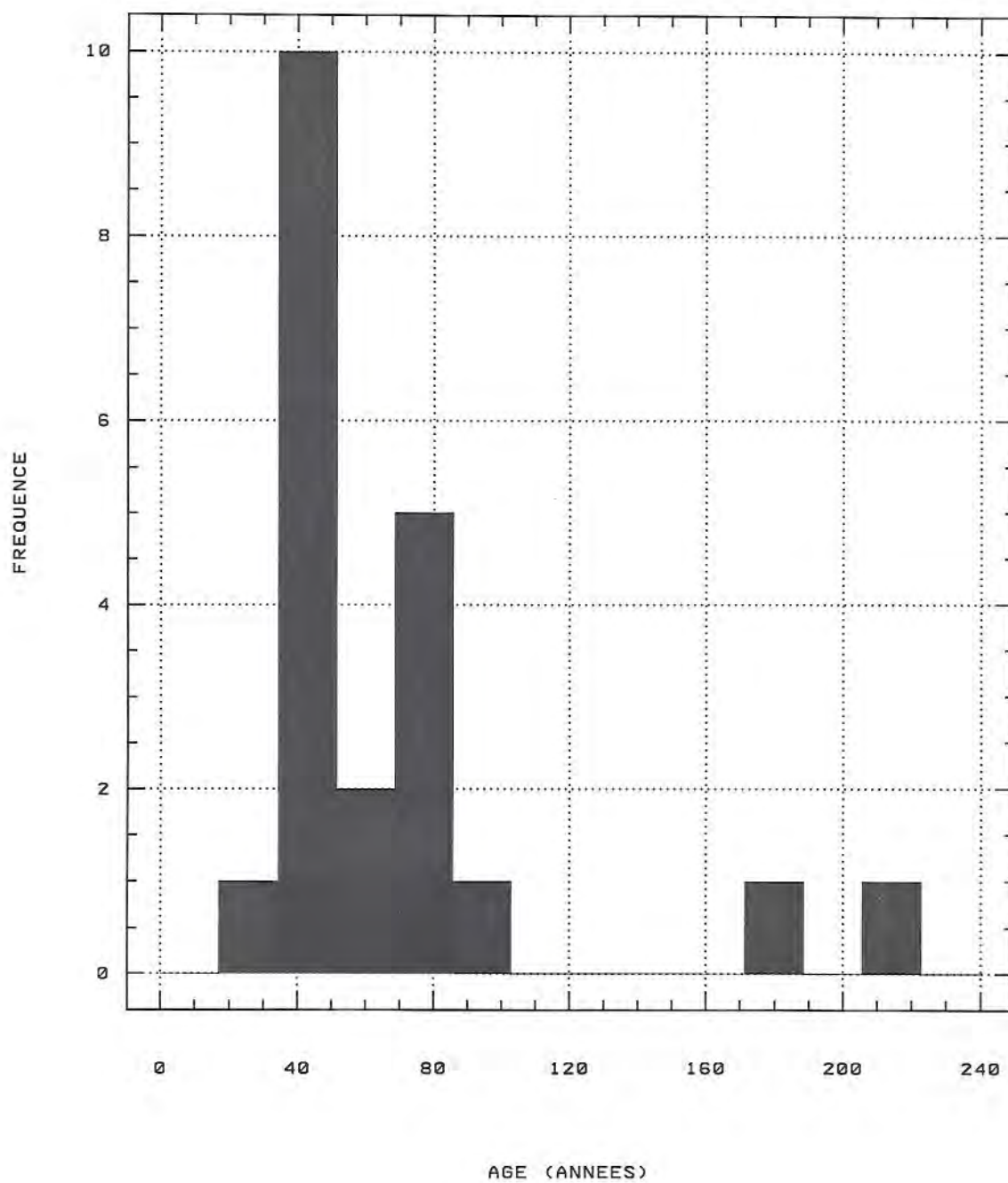


Figure 2.10. Histogramme de fréquence des tiges de la placette « Laurier » par classe d'âge.

surface terrière marchande entre la mesure 1 et la mesure 2 est positive pour 40 des 52 premières placettes. Un point important à souligner, est qu'entre la mesure 2 et la mesure 3, la moyenne de la surface terrière des 101 placettes est passée de 0,461 à 0,430 mètre carré, soit une diminution d'environ 7 %. Dans le cas de la cohorte feuillue, pour les mêmes placettes et pour les mêmes périodes d'observation, on a obtenu une augmentation en surface terrière de 23 %. L'explication la plus plausible à ce phénomène surprenant est que les résineux ayant souffert de la présence de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.), la cohorte feuillue a profité pleinement d'une réduction de la compétition.

Le tableau 2.14 intègre les données des deux tableaux précédents en montrant le rapport de la surface terrière marchande de la cohorte feuillue sur la STM de toutes les essences confondues. Globalement, pour les 101 placettes, les feuillus, après une légère diminution de leur surface terrière relative entre la mesure 1 et la mesure 2, ont profité pleinement de la perturbation qui les favorisait. Sur les figures 2.11 et 2.12, on constate une assez bonne stabilité du rapport STM de la cohorte feuillue sur la STM de toutes les essences, dans la majorité des placettes où des données sont disponibles aux deux périodes d'observation consécutives. Par contre, six placettes évoluent constamment vers un peuplement feuillu pur tandis qu'au contraire, trois autres évoluent vers un peuplement plus résineux. L'une de ces dernières, la placette n° 15, présente successivement les valeurs 64,0, 62,6 et 57,8 comme pourcentage en feuillu.

2.4 Détermination de l'amplitude et du nombre de classes de dhp

Pour utiliser la méthode de projection de tables de peuplement, nous devons déterminer la largeur et le nombre de classes de DHP. D'un point de vue méthodologique, si on opte pour une faible largeur de classe, on se rapproche d'un modèle « arbre individuel » et on s'éloigne d'un modèle « peuplement entier ». Il est bien entendu que plus l'amplitude est réduite, plus le système devient réel. À la limite avec une amplitude d'un mm, chacun des arbres trouve sa classe de DHP sans biais. Par contre, cela conduit à des problèmes informatiques importants. Le principal problème est lié à la promotion; on n'obtiendrait pas seulement des simples, des doubles ou même des triples promues, mais un niveau potentiel de promotion géré par l'accroissement maximal exprimé en mm. Au fil des itérations, cela conduirait à des nombres de tiges infinitésimaux et ces dernières seraient réparties dans un nombre considérable de classes. De plus, les effectifs étant répartis entre 10 essences, le simulateur deviendrait excessivement exigeant en capacité de support infor-

matique, même pour prédire la production d'une seule placette. À mon sens, ce serait une manipulation mathématique inutile d'un grand nombre de données dont plusieurs valeurs nulles au départ. Par la suite, on observerait des fractions de tiges de plus en plus petites au fil des itérations.

Puisque les utilisateurs futurs du modèle de prédiction disposent comme intrants de distributions de tiges par classe de DHP de deux cm, nous avons décidé de conserver cette dimension. Nous croyons que cette amplitude de classe est un compromis acceptable. Il permet l'utilisation d'ordinateurs peu puissants, tout en limitant les biais à des niveaux acceptables. L'importance des biais créés par la répartition des tiges en classes de DHP est discutée à la section 7.3.

Cette décision a une implication dans la détermination du nombre de classes. Les limites inférieures et supérieures interviennent également dans le calcul du nombre de classes. La limite inférieure de l'ensemble des classes est choisie par le plan d'échantillonnage autant au niveau de la conception qu'au niveau de l'utilisation. La plus petite classe s'étendra de 9,0 à 10,9 cm avec un centre de classe fixé à 10 cm.

La limite supérieure est plus difficile à déterminer. Si on la fixe à un niveau assez bas, soit à 50 cm, on obtient des vecteurs dont le nombre d'éléments est limité à 21. Cela implique des opérations mathématiques peu nombreuses; par contre, on supprime tout mouvement (croissance nulle) pour les quelques tiges de forts DHP. Afin de minimiser les biais négatifs engendrés par cette considération, nous avons choisi 74 cm comme centre de la classe supérieure puisqu'une seule tige dépasse ce plafond dans nos données de base. Le nombre de classes de DHP est ainsi fixé à 33, l'amplitude des classes est de 2 cm et l'amplitude de l'ensemble des classes de DHP est $(75-9) = 66$ cm. Toutes les tiges dont le DHP au temps initial est supérieur à 75 cm sont incorporées dans la classe ayant le centre à 74 cm. Dans quelques années, les ordinateurs deviendront de plus en plus puissants et on pourra hausser le nombre de classes.

*

Tableau 2.12 Évolution de la surface terrière marchande de la cohorte feuillue, en mètre carré par placette

NO	PLACETTE	MESURE 1	MESURE 2	MESURE 3	MESURE 4
1	452171081	0.489	0.618	0.664	0.777
2	454274442	0.200	0.329	0.398	0.000
3	454376162	0.510	0.487	0.612	0.000
4	454574142	0.611	0.687	0.793	0.000
5	460274581	0.721	0.601	0.000	0.000
6	460274582	0.762	0.820	0.000	0.000
7	460874452	0.787	0.812	0.000	0.000
8	461274301	0.226	0.310	0.000	0.000
9	461373462	0.309	0.437	0.523	0.000
10	461476081	0.300	0.351	0.000	0.000
11	461476082	0.506	0.634	0.000	0.000
12	461574151	0.485	0.394	0.430	0.000
13	461675431	0.383	0.404	0.000	0.000
14	461874442	0.249	0.209	0.278	0.000
15	462278332	0.607	0.614	0.549	0.000
16	462377512	0.337	0.382	0.000	0.000
17	462577192	0.357	0.400	0.000	0.000
18	462674411	0.443	0.555	0.658	0.000
19	462675161	0.421	0.515	0.000	0.000
20	463378091	0.660	0.544	0.000	0.000
21	463378092	0.380	0.279	0.317	0.000
22	463577592	0.116	0.189	0.000	0.000
23	463674551	0.890	0.962	1.068	0.000
24	463878061	0.588	0.529	0.000	0.000
25	463973282	0.478	0.626	0.721	0.000
26	464074572	0.681	0.644	0.000	0.000
27	464178171	0.110	0.142	0.000	0.000
28	464178392	0.392	0.441	0.000	0.000
29	464278191	0.530	0.596	0.579	0.000
30	464278481	0.920	0.854	0.000	0.000
31	464478361	0.204	0.248	0.000	0.000
32	464573051	0.484	0.473	0.000	0.000
33	464574501	0.321	0.417	0.000	0.000
34	464775082	0.721	0.579	0.382	0.000
35	464873122	0.328	0.409	0.000	0.000
36	464972142	0.838	0.813	0.887	0.000
37	464978421	0.455	0.474	0.000	0.000
38	464978422	0.640	0.646	0.000	0.000
39	465072382	0.306	0.292	0.000	0.000
40	465174421	0.620	0.713	0.000	0.000
41	465274132	0.868	0.703	0.754	0.000
42	465371431	0.729	0.747	0.780	0.000
43	465474421	0.959	0.704	0.777	0.000
44	465674401	0.315	0.407	0.000	0.000
45	465872011	0.126	0.209	0.283	0.000
46	465873162	0.426	0.490	0.571	0.000
47	465974191	0.725	0.511	0.577	0.000
48	465974342	0.786	0.894	0.925	0.971
49	465976422	0.491	0.583	0.000	0.000
50	470073072	0.536	0.673	0.733	0.000
51	470074292	0.496	0.371	0.000	0.000
52	470175101	0.254	0.289	0.000	0.000
101 PEP	MOYENNE	0.458	0.486	0.600	0.874

Tableau 2.13 Évolution de la surface terrière marchande de la cohorte résineuse, en mètre carré par placette

NO	PLACETTE	MESURE 1	MESURE 2	MESURE 3	MESURE 4
1	452171081	0.189	0.186	0.146	0.180
2	454274442	0.261	0.319	0.367	0.000
3	454376162	0.608	0.639	0.764	0.000
4	454574142	0.602	0.655	0.829	0.000
5	460274581	0.516	0.585	0.000	0.000
6	460274582	0.581	0.489	0.000	0.000
7	460874452	0.446	0.479	0.000	0.000
8	461274301	0.089	0.182	0.000	0.000
9	461373462	0.357	0.486	0.508	0.000
10	461476081	0.253	0.365	0.000	0.000
11	461476082	0.213	0.220	0.000	0.000
12	461574151	0.474	0.456	0.476	0.000
13	461675431	1.367	0.821	0.000	0.000
14	461874442	0.214	0.218	0.182	0.000
15	462278332	0.342	0.366	0.402	0.000
16	462377512	0.794	0.882	0.000	0.000
17	462577192	0.891	0.930	0.000	0.000
18	462674411	0.330	0.290	0.346	0.000
19	462675161	0.178	0.158	0.000	0.000
20	463378091	1.096	1.190	0.000	0.000
21	463378092	1.417	1.536	1.811	0.000
22	463577592	0.592	0.558	0.000	0.000
23	463674551	0.297	0.259	0.092	0.000
24	463878061	0.591	0.637	0.000	0.000
25	463973282	0.363	0.435	0.300	0.000
26	464074572	0.559	0.556	0.000	0.000
27	464178171	0.177	0.215	0.000	0.000
28	464178392	0.429	0.498	0.000	0.000
29	464278191	0.218	0.240	0.009	0.000
30	464278481	1.040	1.137	0.000	0.000
31	464478361	0.542	0.574	0.000	0.000
32	464573051	0.676	0.721	0.000	0.000
33	464574501	0.486	0.871	0.000	0.000
34	464775082	0.203	0.222	0.104	0.000
35	464873122	0.540	0.576	0.000	0.000
36	464972142	0.334	0.411	0.417	0.000
37	464978421	0.321	0.412	0.000	0.000
38	464978422	0.270	0.346	0.000	0.000
39	465072382	0.170	0.140	0.000	0.000
40	465174421	0.276	0.342	0.000	0.000
41	465274132	0.186	0.241	0.235	0.000
42	465371431	0.230	0.270	0.471	0.000
43	465474421	0.587	0.620	0.433	0.000
44	465674401	0.560	0.683	0.000	0.000
45	465872011	0.382	0.509	0.616	0.000
46	465873162	0.399	0.574	0.524	0.000
47	465974191	0.136	0.191	0.189	0.000
48	465974342	0.295	0.384	0.382	0.406
49	465976422	0.198	0.165	0.000	0.000
50	470073072	0.351	0.478	0.473	0.000
51	470074292	0.416	0.530	0.000	0.000
52	470175101	0.601	0.681	0.000	0.000
101 PEP	MOYENNE	0.414	0.461	0.430	0.293

Tableau 2.14 Importance de la surface terrière marchande de la cohorte feuillue en pourcentage par rapport à la surface terrière toutes essences confondues

NO	PLACETTE	MESURE 1	MESURE 2	MESURE 3	MESURE 4
1	452171081	72.1	76.9	82.0	81.2
2	454274442	43.3	50.7	52.1	0.0
3	454376162	45.6	43.3	44.5	0.0
4	454574142	50.4	51.2	48.9	0.0
5	460274581	58.3	50.7	0.0	0.0
6	460274582	56.7	62.6	0.0	0.0
7	460874452	63.9	62.9	0.0	0.0
8	461274301	71.8	63.0	0.0	0.0
9	461373462	46.4	47.3	50.7	0.0
10	461476081	54.2	49.0	0.0	0.0
11	461476082	70.4	74.3	0.0	0.0
12	461574151	50.6	46.4	47.4	0.0
13	461675431	21.9	33.0	0.0	0.0
14	461874442	53.8	49.0	60.5	0.0
15	462278332	64.0	62.6	57.8	0.0
16	462377512	29.8	30.2	0.0	0.0
17	462577192	28.6	30.1	0.0	0.0
18	462674411	57.3	65.7	65.5	0.0
19	462675161	70.2	76.5	0.0	0.0
20	463378091	37.6	31.3	0.0	0.0
21	463378092	21.2	15.4	14.9	0.0
22	463577592	16.3	25.3	0.0	0.0
23	463674551	75.0	78.8	92.1	0.0
24	463878061	49.9	45.4	0.0	0.0
25	463973282	56.8	59.0	70.6	0.0
26	464074572	54.9	53.7	0.0	0.0
27	464178171	38.4	39.7	0.0	0.0
28	464178392	47.8	47.0	0.0	0.0
29	464278191	70.9	71.3	98.5	0.0
30	464278481	46.9	42.9	0.0	0.0
31	464478361	27.3	30.2	0.0	0.0
32	464573051	41.7	39.6	0.0	0.0
33	464574501	39.7	32.4	0.0	0.0
34	464775082	78.1	72.3	78.6	0.0
35	464873122	37.8	41.5	0.0	0.0
36	464972142	71.5	66.4	68.0	0.0
37	464978421	58.6	53.5	0.0	0.0
38	464978422	70.3	65.1	0.0	0.0
39	465072382	64.2	67.6	0.0	0.0
40	465174421	69.2	67.6	0.0	0.0
41	465274132	82.3	74.5	76.2	0.0
42	465371431	76.0	73.5	62.4	0.0
43	465474421	62.0	53.2	64.2	0.0
44	465674401	36.0	37.3	0.0	0.0
45	465872011	24.8	29.1	31.4	0.0
46	465873162	51.7	46.1	52.2	0.0
47	465974191	84.2	72.8	75.4	0.0
48	465974342	72.7	70.0	70.8	70.5
49	465976422	71.3	77.9	0.0	0.0
50	470073072	60.5	58.5	60.8	0.0
101 PEP	MOYENNE	53.3	52.5	62.0	75.9

2.4.1 Méthode de projection de tables de peuplement

Le modèle doit répondre aux besoins de nos clients, les aménagistes forestiers. Ces derniers doivent prévoir la dynamique des peuplements et les aménager de façon durable afin d'assurer la protection et la productivité des territoires qui leur sont confiés.

Notre approche conceptuelle est la méthode de projection de tables de peuplement. Son but consiste à fournir une estimation de l'accroissement futur d'un peuplement à partir d'un accroissement passé. La mécanique de fonctionnement est simple : les arbres sont répartis par classe de DHP. Par la suite, ils entrent en mouvement au cours d'itérations successives et cheminent vers des classes supérieures : l'accroissement est ainsi simulé. Dans notre cas, on appelle « modèle de simulation » un ensemble d'opérations informatiques et une succession de relations mathématiques basées sur l'implantation de la méthode. Ainsi, on prend en compte les diverses caractéristiques des peuplements et du milieu de croissance pour les intégrer dans un système aussi cohérent dans sa conception, que simple dans son utilisation.

Cette approche est pleinement justifiée par le fait que les programmes officiels d'inventaire forestier du SIF fournissent des images suffisamment précises, mais statiques de l'état des peuplements. Ainsi, les utilisateurs reçoivent des tables de peuplement, c'est-à-dire des distributions de tiges par essence et par classe de DHP pour les peuplements à aménager. Ils ne disposent pas des dimensions exactes de chaque arbre. Il serait utopique de construire un modèle utilisable au niveau « arbre individuel » dans de telles circonstances.

En utilisant un tel modèle, il faudrait en premier lieu simuler un DHP théorique à chacune des tiges avant de les incorporer dans un processus d'accroissement.

En se référant à son utilisation probable, le système est basé sur les trois hypothèses suivantes :

1. tous les arbres d'une même classe de DHP se distribuent dans la classe de manière uniforme;
2. tous les arbres d'une même classe de DHP ont un taux d'accroissement semblable;
3. tous les arbres d'une même classe de DHP se voient assignés un DHP égal au point central de la classe lors de l'inventaire forestier.

On verra à la section 7.3 que ces hypothèses simplificatrices en termes de simulation ont des conséquences non négligeables. Ces hypothèses découlent obligatoirement des données disponibles des inventaires forestiers conventionnels.

Au niveau de la conception, nous disposons cependant de données plus précises pour chacun des individus. On peut ainsi élaborer un système hybride, qui est au niveau des « arbres individuels » lors de l'estimation des équations de croissance et au niveau des « classes de DHP » dans son utilisation. Cette approche originale est dictée par les deux sortes d'inventaire forestier conventionnel au Québec et par le souci d'utiliser pleinement l'information disponible pour la conception.

Le réseau des placettes-échantillons permanentes est considéré comme l'ensemble de référence sur lequel on appuie la modélisation. On bénéficie d'observations de qualité au niveau des individus. Cette procédure cherche à utiliser pleinement les caractéristiques de cette banque de données. Nous élaborerons davantage sur l'implantation des facteurs de mouvement des tiges à la section 6.4 dans le chapitre traitant de l'accroissement des survivants.

2.4.2 Innovations apportées à la méthode

D'après Rondeux (1993), la méthode de projection de tables de peuplement peut parfois souffrir d'un manque de rigueur : elle n'est pas exempte de critiques. Dans beaucoup de cas, on observe une surestimation des prédictions due à l'accroissement en grosseur qui tend à diminuer relativement tôt dans la vie du peuplement, en se basant sur des accroissements antérieurs pour les appliquer aux mêmes peuplements. À l'avenir, il faudra s'attendre à ce genre de biais. À moins de trouver une solution à ce problème, on se limite à construire un simulateur utile sur une courte période.

On espère surmonter le problème lors de l'élaboration du modèle, en utilisant un grand nombre de peuplements répartis dans toute la gamme des niveaux de maturité. Nous croyons possible d'intégrer dans les équations de prédiction des variables représentatives du niveau de maturité. Lors de l'utilisation du modèle, ces variables sont actualisées itérativement pour permettre de simuler jusqu'à un âge plus avancé (long terme). À ce moment-ci, le lecteur comprendra que le concepteur se trouve à la merci de la disponibilité des données.

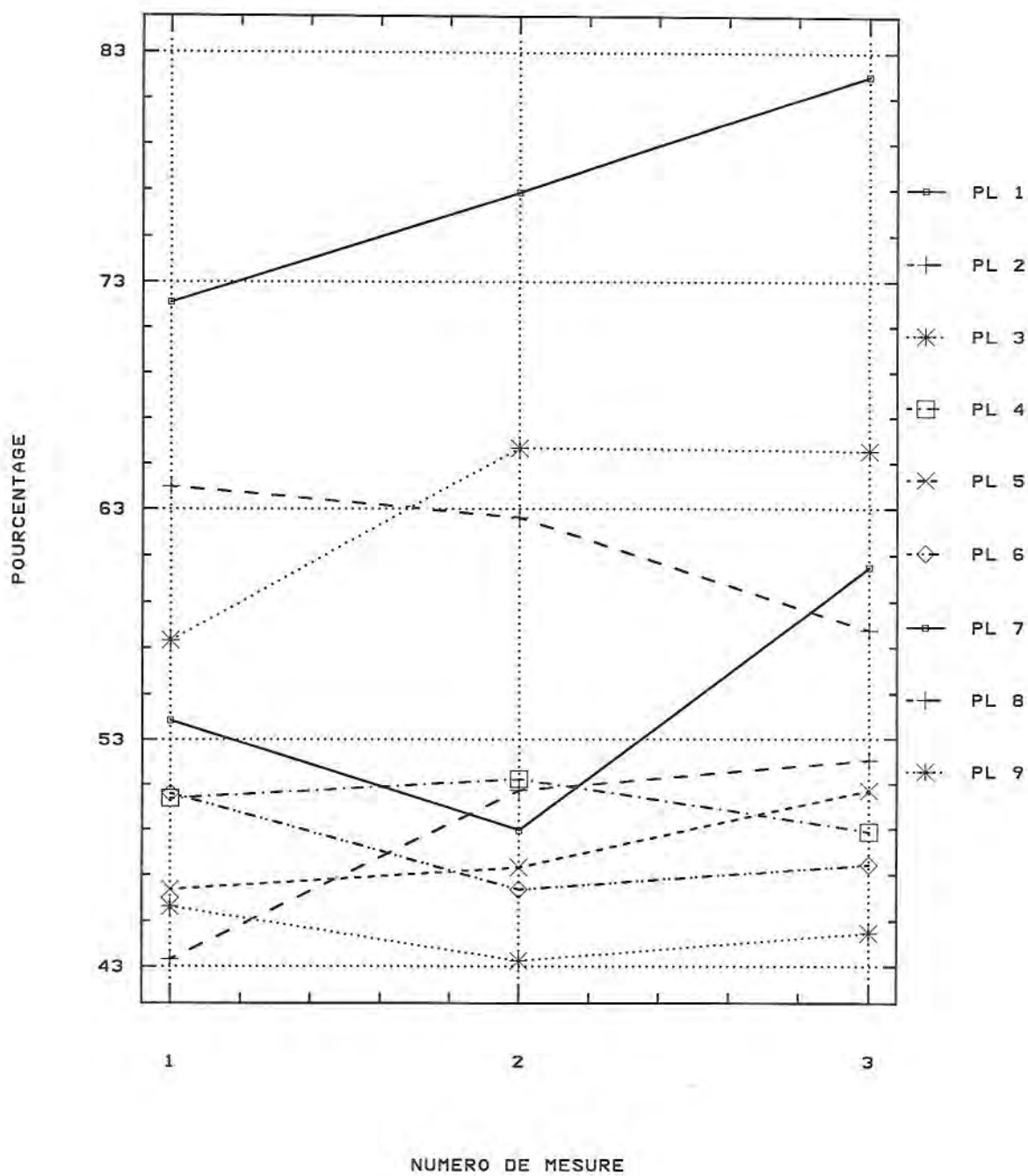


Figure 2.11. Évolution dans le temps du ratio de la STM de la cohorte feuillue sur la STM toutes essences, pour les neuf premières placettes.

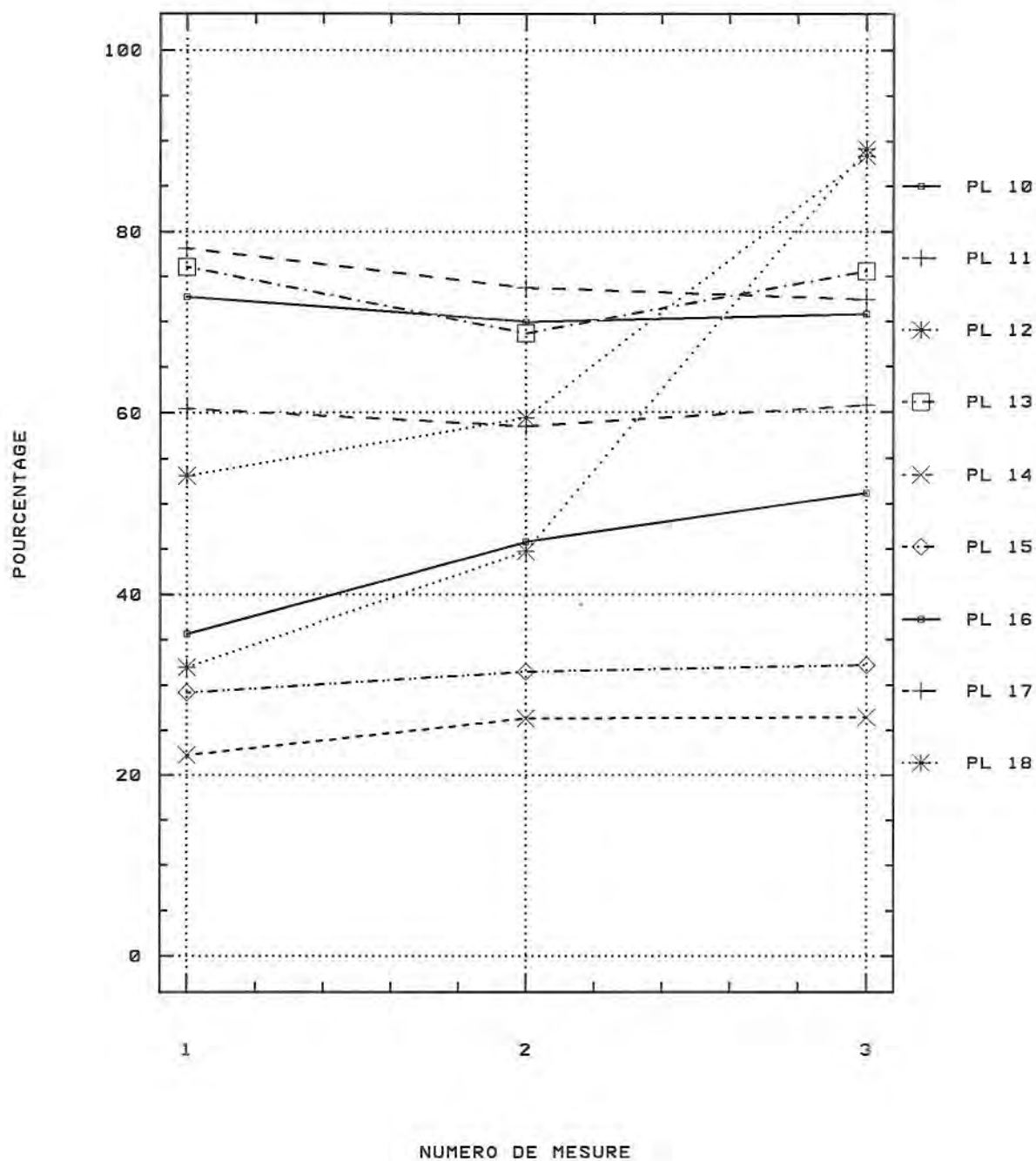


Figure 2.12. Évolution dans le temps du ratio de la STM de la cohorte feuillue sur la STM toutes essences, pour les placettes 10 à 18.

Spurr (1952) affirmait que la méthode est avant tout adaptée aux prédictions à court terme, sur un horizon ne dépassant pas 15 à 20 ans. Nous espérons que le modèle *BOJRES* fournisse des prédictions acceptables pour une plus longue période.

Une deuxième innovation que nous comptons apporter, c'est l'adaptabilité ou la généralisation du système à des peuplements différents en termes de densité et de composition. On y arrive en introduisant des variables synthétiques ou complexes dans l'estimation des coefficients des équations régissant les diverses prédictions. Les variables envisagées sont l'indice de densité (ID) décrit à la section 2.4.5, la surface terrière supérieure (STS) décrite à la section 2.4.6, le ratio RDHP décrit à la section 2.4.7 et la hauteur dominante (HDO) décrite à la section 3.5. Cette dernière variable joue un rôle extrêmement important, car elle devient une réalisation concrète de l'indice de qualité de station. Son introduction dans l'estimation de la hauteur individuelle en fonction du DHP et de la HDO, et indirectement dans la relation du volume en fonction de la hauteur individuelle et du DHP, est hautement souhaitable puisque chaque peuplement à simuler sera considéré comme un ensemble unique. Avec cette innovation, le simulateur devrait fournir des prédictions sur mesure en tenant compte des caractéristiques particulières de chaque peuplement.

La troisième innovation va dans le même sens que les deux premières, mais elle pousse davantage l'audace. D'après Rondeux (1993), la méthode est bien adaptée aux peuplements équiennes et purs. Nous comptons nous en servir pour des peuplements mélangés avec des structures variables parfois équiennes, beaucoup plus souvent inéquiennes. Ces peuplements présentent habituellement une allure multiétagée. Nous comptons y arriver en traitant séparément mais simultanément chacune des essences. En effet, chaque essence bénéficiera de ses propres équations de prédiction. Ces dernières contiendront des variables spécifiques à l'essence et des variables générales se référant à l'ensemble des essences.

2.4.3 Phénomènes analysés

Le simulateur comprend trois composantes principales : le recrutement, la mortalité et l'accroissement des survivants. Ces composantes seront traitées en détail respectivement aux chapitres 4, 5 et 6. Les trois composantes sont le cœur du système car elles dirigent toute la croissance et la dynamique des tiges de chacune des essences.

2.4.4 Détermination de la longueur des périodes de croissance

Dans le but de déterminer des taux temporels de recrutement, d'accroissement et de mortalité, il est important d'estimer les durées de croissance entre deux cueilletes consécutives d'information le plus exactement possible. À ce sujet, Burgman *et al.* (1994) écrivaient :

« The models developed above could be improved in a number of ways. We used crude estimates of time by basing time on calendar years rather than on the number of growing seasons. In most cases, plots were remeasured at approximately the same time of year and the differences between calendar years and the number of growing seasons would be slight, but there were some cases in which remeasurements were done at different times, and including the number of growing seasons may improve both the statistical fit and the predictive power of the models ».

Dans notre cas, comme solution partielle à ce problème, nous avons élaboré la fonction *CDUREE*. Cette dernière se retrouve dans un rapport interne (Carpentier 1995) de la Direction de la recherche forestière (DRF). Dans des pays où la température est plus clémente, les travaux d'inventaire forestier peuvent être réalisés en hiver durant la dormance des arbres. Cette période de dormance où l'état de la forêt devient stable débute tôt à l'automne pour se terminer tard au printemps de l'année civile suivante.

En dehors de cette période de dormance, on observe des changements d'état; on est dans cet espace temporel entre deux années physiologiques mais toujours dans la même année civile. Pour faciliter les calculs de durée, il est impératif de fonctionner en terme d'année et de fraction d'année. Pour estimer les fractions d'année, il faut donc passer du système de détermination de temps mensuelle avec la base 12 et du système journalier avec une moyenne d'environ 30,5 vers un système plus simple. Nous adoptons le système universellement accepté : le système décimal. On peut ainsi procéder par simple soustraction de deux dates codifiées autrement pour mesurer la durée d'une période de croissance. On doit statuer sur quatre points.

Premièrement, l'année de référence est le printemps. Lorsque la cueillette d'observations a lieu à l'automne, il s'agit d'ajouter une unité à l'année civile courante. Deuxièmement, on doit statuer sur la longueur de la période de croissance afin de lui donner une pondération par rapport à l'année entière. Troisiè-

mement, on doit décider des dates de début et de fin de cette période. Dans le but de simplifier les opérations informatiques, la croissance en diamètre débute le premier juin et se termine à la fin septembre. En supposant que chacun des quatre mois de croissance possède une durée de 30,5 jours, on obtient une période de croissance de 122 jours. Cette période a donc une pondération de $365 \div 122 \approx 3$ par rapport à l'année complète. Quatrièmement, la croissance est uniforme durant la période active. Il devient assez simple de spécifier une fonction *CDUREE* pour qu'elle fournisse des estimés de la fraction d'année à ajouter.

La fonction est codifiée pour donner une valeur nulle à la fraction d'année tant que l'on n'a pas atteint le 31 mai. À partir de cette date, chacun des jours possède un poids de 3; ainsi le 30 septembre, la fraction d'année atteint l'unité, soit le maximum autorisé. Après cette date, on se considère physiologiquement comme étant dans une nouvelle année civile même si on n'a pas encore atteint le premier janvier.

En appliquant cette procédure aux moments des observations initiales et finales, on obtient deux valeurs décimales faciles à soustraire. Les résultats sont montrés pour les 53 premières placettes dans le tableau 2.15. Les durées des périodes de croissance sont variables d'une placette à l'autre ainsi que d'une période à l'autre. La durée de croissance moyenne de la période 1-2 est égale à 8,53 années avec un coefficient de variation égale à 23,7 %. Les valeurs égales à zéro signifient que l'observation finale n'est pas encore disponible. Nous avons 101 placettes avec deux dates d'observation, 30 avec trois dates, seulement deux avec quatre dates. Sur la figure 2.13 concernant les longueurs des périodes de croissance 1-2, on observe une distribution bimodale.

2.4.5 Détermination d'un indice de densité

Un indice de densité (ID) est défini comme une variable aléatoire qui prendra une certaine valeur pour chacune des placettes. C'est une variable de type « placette » qui ne fait aucune distinction de l'identification de l'essence. On peut donc parler de densité pour toutes les essences confondues.

Un tel indice est utile pour comparer la densité (*stocking*) d'une placette à l'autre ainsi que d'une mesure à l'autre. Il doit être, général pour s'adapter à toute placette, stable pour fournir une information invariable ou du moins comparable dans le temps. Il sera particulièrement utile comme variable explicative dans les phénomènes de recrutement et de croissance. L'indice est basé sur une relation stable dans le temps, la courbe générale du nombre de tiges marchandes

en fonction du DHP moyen (DHPM) marchand pour toutes les essences confondues. Lorsqu'une placette présente plus de tiges que la quantité prédite par l'équation, compte tenu de son DHPM, on la qualifie de plus dense que la moyenne, sinon l'inverse.

Courbe de référence

Nous avons essayé plusieurs équations pour analyser la relation qui existe entre le nombre de tiges marchandes (NTM) et le DHP moyen marchand (DHPM). Nous avons finalement opté pour des raisons d'efficacité pour un modèle simple qui présente seulement deux coefficients. On peut considérer le modèle « simple » parce qu'on y retrouve une seule variable explicative. Il est non linéaire puisque la variable explicative intervient d'une manière non linéaire dans l'équation : cette dernière se trouve l'exposant du coefficient β_2 .

$$NTM = \beta_1 (\beta_2 DHPM) \times \varepsilon \quad (2.1)$$

Le modèle pourrait être linéarisé au moyen d'une transformation logarithmique, on obtient :

$$\ln NTM = \ln \beta_1 + DHPM \ln \beta_2 + \ln \varepsilon$$

Cette procédure suppose deux hypothèses sur la nature du bruit (ε) :

1. la variable aléatoire ε intervient de manière multiplicative et non additive dans la formulation 2.1;
2. le vecteur $\ln \varepsilon$ est centré et de variance σ^2 et ne dépend pas de $\ln \beta_1 + DHPM \ln \beta_2$.

La linéarisation par transformation logarithmique d'un problème de régression doit tenir compte de la forme de la fonction de régression et de la structure du bruit. Étant donné que nous disposons de logiciels pour la régression non linéaire, il devient plus sécuritaire de s'en servir. Cependant, nous devons souligner que les estimateurs obtenus par cette procédure sont, en général, non linéaires et biaisés. Les estimateurs obtenus ne sont plus gaussiens et ils sont dotés de propriétés asymptotiques (Antoniadis *et al.* 1992, p. 53).

D'après le tableau 2.16, chacun des deux coefficients est significatif au seuil $\alpha = 0,05$ même si la valeur du t de Student pour le deuxième est nettement supérieure. Ces conclusions sont obtenues en se basant sur des approximations déduites du comportement asymptotique des estimateurs. Lors d'essais non montrés, avec des modèles plus complexes à trois coefficients, on obtient des coefficients β_1 , β_2 et β_3 présentant de valeurs absolues inférieures

Tableau 2.15 La durée en années des périodes de croissance

NO	PLACETTE	PÉRIODE 1-2	PÉRIODE 2-3	PÉRIODE 3-4
1	452171081	7.36	7.03	7.27
2	454274442	8.37	7.48	0.00
3	454376162	7.23	13.82	0.00
4	454574142	7.54	8.39	0.00
5	460274581	8.27	0.00	0.00
6	460274582	8.27	0.00	0.00
7	460874452	8.27	0.00	0.00
8	461274301	8.43	0.00	0.00
9	461373462	10.85	5.36	0.00
10	461476081	7.46	0.00	0.00
11	461476082	7.46	0.00	0.00
12	461574151	11.71	4.50	0.00
13	461675431	7.79	0.00	0.00
14	461874442	8.02	7.39	0.00
15	462278332	6.82	10.44	0.00
16	462377512	7.36	0.00	0.00
17	462577192	6.59	0.00	0.00
18	462674411	8.18	7.50	0.00
19	462675161	7.25	0.00	0.00
20	463378091	7.06	0.00	0.00
21	463378092	7.06	13.09	0.00
22	463577592	7.24	0.00	0.00
23	463674551	6.81	9.00	0.00
24	463878061	7.24	0.00	0.00
25	463973282	9.92	5.76	0.00
26	464074572	7.22	0.00	0.00
27	464178171	6.58	0.00	0.00
28	464178392	6.81	0.00	0.00
29	464278191	6.80	13.14	0.00
30	464278481	6.52	0.00	0.00
31	464478361	6.35	0.00	0.00
32	464573051	9.75	0.00	0.00
33	464574501	13.18	0.00	0.00
34	464775082	6.82	13.66	0.00
35	464873122	10.37	0.00	0.00
36	464972142	10.48	5.70	0.00
37	464978421	6.82	0.00	0.00
38	464978422	6.82	0.00	0.00
39	465072382	10.28	0.00	0.00
40	465174421	8.49	0.00	0.00
41	465274132	11.12	4.55	0.00
42	465371431	7.16	13.84	0.00
43	465474421	8.55	7.25	0.00
44	465674401	8.39	0.00	0.00
45	465872011	10.25	6.11	0.00
46	465873162	10.11	5.62	0.00
47	465974191	11.32	4.35	0.00
48	465974342	8.22	5.06	2.42
49	465976422	6.25	0.00	0.00
50	470073072	10.32	5.43	0.00
51	470074292	8.20	0.00	0.00
52	470175101	7.20	0.00	0.00
53	470272081	9.85	0.00	0.00
...				
101 PEP	MOYENNE	8.53	8.08	4.84

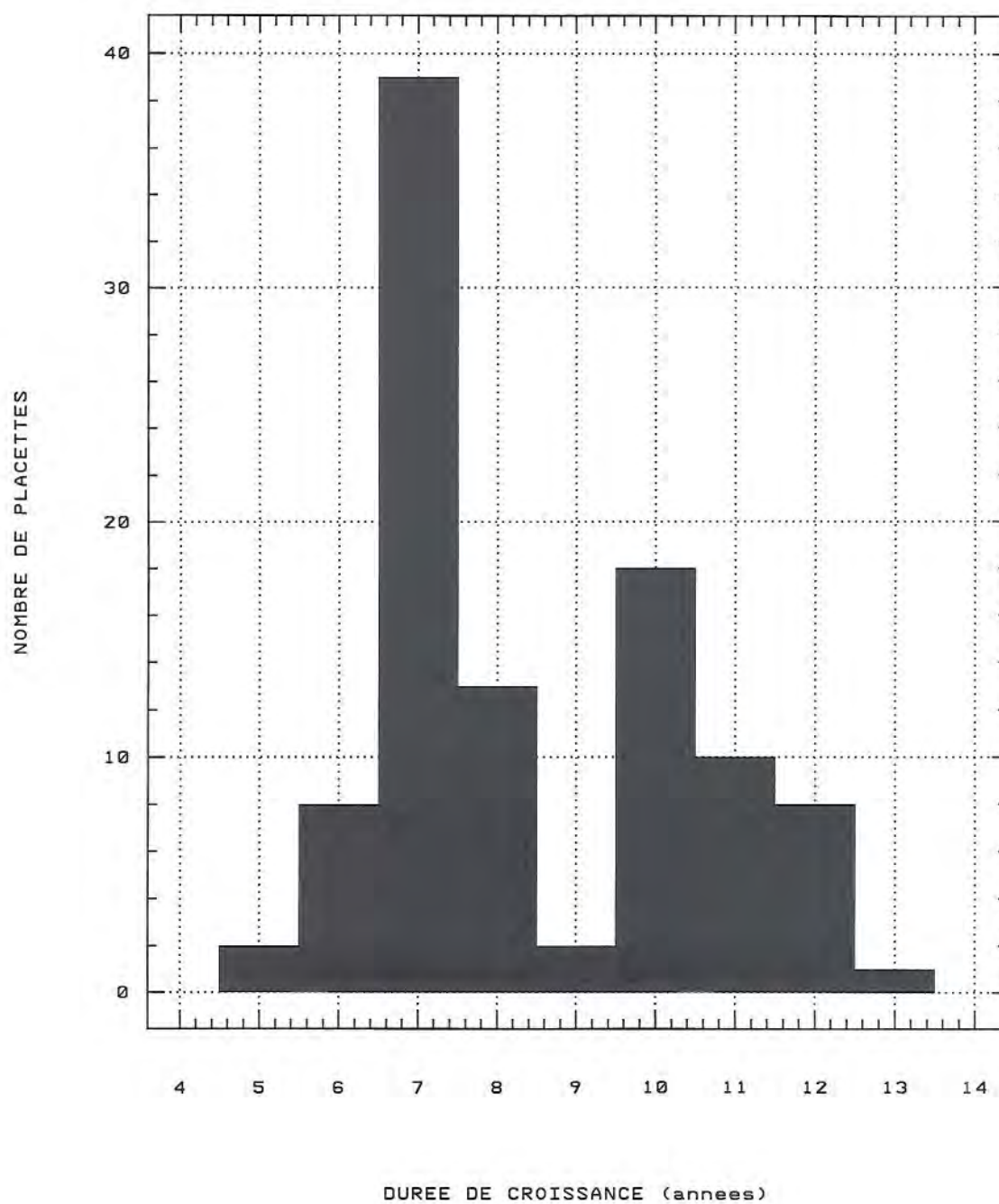


Figure 2.13. Histogramme de fréquence du nombre de placettes réparties en fonction de la durée de croissance entre les observations 1 et 2.

Tableau 2.16. Coefficients de la régression non linéaire pour l'estimation du nombre de tiges marchandes en fonction du DHP marchand moyen**Groupe : toutes essences confondues**

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
B ₁	79,456321	8,86592939	8,962
B ₂	0,9495074	0,00459104	206,818

Tableau 2.17. Table d'analyse de la variance pour la régression non linéaire pour l'estimation du nombre de tiges marchandes en fonction du DHP marchand moyen**Groupe : toutes essences confondues**

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	161810,30	2	80905,15	1122,21
Erreur	16581,70	230	72,09	
Total	178392,00	232		
Total (Corr.)	23426,41	231		

$R^2 = 0,2922$

à l'unité pour leurs statistiques *t* de Student respectives. Au tableau 2.17, le modèle original présente une valeur de R^2 égale à 0,29. Cette faible valeur est intéressante dans notre cas, elle signifie que les placettes présentent des niveaux de densité très différents les uns des autres. Cela justifie la dotation d'un indice de densité à chacune des placettes.

Cet indice relatif (ID) est établi comme étant le rapport entre le nombre de tiges marchandes observé dans la placette et le nombre de tiges calculé par l'équation de régression 2.1 en se servant de la valeur prise par la variable DHPM pour cette placette.

$$ID = \frac{NTM_{obs}}{NTM_{cal}} \quad (2.2)$$

Avec cette procédure, on doit s'attendre à obtenir, pour un ensemble de placettes, autant de valeurs de l'indice de densité supérieures à l'unité que d'autres s'établissant entre zéro et un. Cette affirmation est évidente en se référant à la figure 2.14, où la courbe de référence sépare approximativement le nuage de points en deux parties possédant une égale représentation. La moyenne des valeurs des indices de densité pour les placettes qui ont servi à estimer les coefficients de l'équation (2.1), devrait être égale à 1 si l'équation est sans biais; dans notre cas la moyenne se situe à 1,0014.

2.4.6 Détermination de la variable surface terrière supérieure, pour toutes les essences confondues

L'intensité de la croissance individuelle des arbres d'un peuplement varie en relation inverse de la surface terrière. Cette dernière peut être considérée comme un indice de densité grossier. Il est possible d'enrichir la relation en faisant intervenir un concept plus approprié en modifiant cette variable explicative de base : c'est le concept de surface terrière supérieure (STS) à une tige donnée. On passe ainsi d'une variable « placette » à une variable « arbre individuel ». En effet, la surface terrière supérieure à une tige donnée est la sommation des surfaces terrières individuelles de toutes les tiges qui lui sont plus grosses en DHP. Pour établir la STS individuelle, il suffit de :

1. trier les tiges selon le DHP, en ordre ascendant
2. calculer la surface terrière de chacune des tiges
3. procéder à la sommation des surfaces terrières dont le rang est supérieur à une tige donnée.

Ainsi la plus grosse tige de la placette est dotée d'une STS nulle, tandis que la plus petite est dotée d'une STS équivalente à la surface terrière totale moins sa propre surface terrière. L'utilisateur du modèle n'a pas en main la liste de tous les DHP individuels mais il dispose plutôt de tables de peuplement

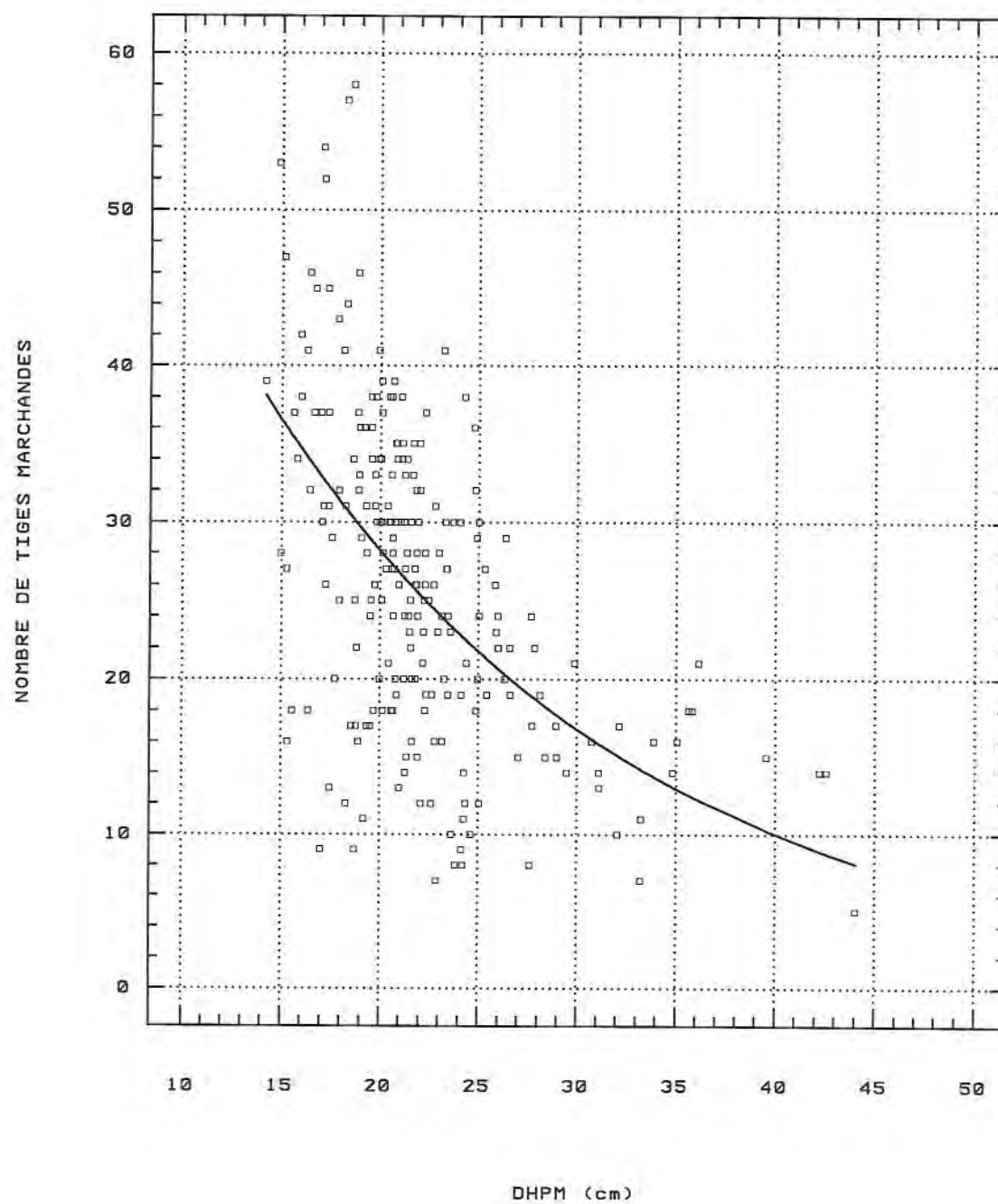


Figure 2.14. Relation entre le nombre de tiges marchandes par placette et le DHPM.

Tableau 2.18 Détermination de la surface terrière supérieure (STS) à une classe de DHP donnée dans le cas d'une distribution des tiges par classe de DHP

DHP INF. (cm)	ST CLASSE (m*2)	NOMBRE TIGES	ST EN (m*2)	STS BRUTE (m*2)	STS RÉDUITE (m*2)	STS FINALE (m*2)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) 1
			$(2) \times (3)$	$\theta + \backslash \theta (4)$	$(5) - .5 \times (4)$	$(6) - .5 \times (4)$
10	0.0079	1	0.0079	1.1197	1.1157	1.1118
12	0.0113	0	0.0000	1.1118	1.1118	1.1118
14	0.0154	1	0.0154	1.1118	1.1041	1.0964
16	0.0201	9	0.1810	1.0964	1.0059	1.0059
18	0.0254	4	0.1018	0.9155	0.8646	0.8646
20	0.0314	0	0.0000	0.8137	0.8137	0.8137
22	0.0380	0	0.0000	0.8137	0.8137	0.8137
24	0.0452	7	0.3167	0.8137	0.6553	0.6553
26	0.0531	4	0.2124	0.4970	0.3908	0.3908
28	0.0616	2	0.1232	0.2846	0.2231	0.2231
30	0.0707	1	0.0707	0.1615	0.1261	0.0908
32	0.0804	0	0.0000	0.0908	0.0908	0.0908
34	0.0908	1	0.0908	0.0908	0.0454	0.0000
36	0.1018	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
38	0.1134	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	0.1257	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
42	0.1385	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
44	0.1521	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
46	0.1662	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
48	0.1810	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50	0.1963	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
52	0.2124	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
54	0.2290	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
56	0.2463	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
58	0.2642	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
60	0.2827	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
62	0.3019	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
64	0.3217	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
66	0.3421	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
68	0.3632	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
70	0.3848	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
72	0.4072	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
74	0.4301	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

1: CETTE OPÉRATION EST EXÉCUTÉE SEULEMENT SI LE NOMBRE DE TIGES DE LA CLASSE DE DHP EST ÉGAL A 1

par essence. Il est essentiel d'établir une procédure qui permette de calculer une surface terrière supérieure à chacune des classes de DHP, cohérente avec celle que nous utilisons pour la calibration du modèle. Cette procédure est décrite dans le tableau 2.18 et la codification informatique est disponible dans un rapport interne de la DRF (Carpentier 1995). Dans la colonne 5 du tableau 2.18, le symbole APL, θ sert à effectuer la rotation des valeurs de la colonne 4 et le symbole $APL, +\backslash$ signifie « addition cumulative des valeurs » de la colonne 4 déjà inversées par la rotation; la fonction porte le nom de *TSTSUP*.

La surface terrière supérieure est une variable « arbre » pour le modélisateur, elle devient une variable « classe de DHP » pour l'utilisateur. Cette variable sert à remplacer la notation de l'étage de dominance dans les équations d'accroissement : cette dernière n'étant pas recueillie dans les inventaires forestiers conventionnels. Nous verrons à la section 6.5 que cette variable est très utile, elle intervient comme régresseur dans l'équation (6.5) de prédiction de l'accroissement en surface terrière.

2.4.7 Détermination de la variable RDHP

Il est possible d'élaborer une autre variable synthétique : le rapport du DHP individuel sur le DHP moyen quadratique (DHPM). Cette variable (RDHP) est un pseudo indice de vigueur et elle a un rôle, comme variable explicative, semblable à celui de la surface terrière supérieure. Elle apporte une information précise sur la grosseur relative de chacune des tiges par rapport à toutes celles présentes dans la placette; elle est cependant moins puissante que la STS parce qu'elle ne renseigne pas sur le niveau de volume (*stocking*). Par contre, on verra au chapitre VI qu'elle devient particulièrement utile lorsqu'elle est jointe à la surface terrière marchande (STM) qui est une variable placette. Pour l'utilisateur, le RDHP devient une variable « classe de DHP » qui est estimée en divisant la valeur du centre de chacune des classes de DHP par le DHPM des tiges de toutes les essences confondues.

Chapitre trois

Cubage individuel des arbres

L'objectif de ce chapitre est d'élaborer les outils mathématiques essentiels pour procéder à la détermination des volumes marchands bruts par tige et par placette.

De nombreuses méthodes existent pour procéder au cubage individuel des tiges mesurées lors des inventaires forestiers. Au Québec, il est habituel d'utiliser le tarif de cubage général (Perron 1983). C'est un tarif élaboré à partir d'analyses de tiges qui exige deux entrées, la hauteur et le DHP. Les données initiales provenant d'analyses de tiges sommaires ont été traitées par l'auteur du tarif pour chacune des essences au moyen de régressions linéaires multiples. Nous utiliserons ce tarif car c'est le seul reconnu et accepté actuellement par le gouvernement du Québec.

3.1 La spécification des relations « Hauteur-DHP »

Pour utiliser efficacement le tarif de cubage de Perron, il devient important d'estimer correctement chacune des deux variables explicatives, tant la hauteur que le DHP. Lors des inventaires forestiers, le DHP de chaque arbre est toujours mesuré avec précision, mais ce n'est pas le cas de la hauteur individuelle (H). La mesure de cette dernière nécessite des manipulations plus délicates; elle est donc beaucoup plus onéreuse à obtenir que le DHP. La hauteur est observée pour seulement un faible effectif de tiges dans chacune des placettes. Il devient nécessaire d'élaborer un modèle mathématique pour prédire la hauteur des tiges non mesurées en se référant aux autres.

Le modèle mathématique peut être paramétré à différents niveaux :

- 3.1.1 - multispécifique et multi stade évolutif
- 3.1.2 - multispécifique et mono stade évolutif
- 3.1.3 - monospécifique et multi stade évolutif
- 3.1.4 - monospécifique et mono stade évolutif.

3.1.1 multispécifique et multi stade évolutif

Un modèle est qualifié de multispécifique lorsqu'il considère globalement un ensemble d'arbres d'essences différentes qui présentent des relations allométriques semblables. Par multi stade évolutif, on comprend qu'une même équation est appliquée à un ensemble de placettes qu'elles soient jeunes, adultes ou même surannées. Dans ce cas-ci, on simplifie à outrance : une seule équation doit satisfaire toutes les essences et toutes les placettes quel que soit leur stade d'évolution. C'est une solution plausible lorsque les essences sont très nombreuses et que l'effectif reste faible pour chacune d'elles. Dans une telle circonstance, il y a lieu de s'attendre à une variance élevée.

3.1.2 Multispécifique et mono stade évolutif

Ici, il n'existe aucune distinction d'essences. Par contre, le stade évolutif est considéré. Il y a au moins deux manières d'y parvenir : en divisant la population échantillonnée en sous-populations basées sur le stade évolutif, ou en incorporant une variable explicative supplémentaire qui fournit une indication continue du stade évolutif. À cet effet, nous suggérons l'utilisation de l'âge moyen, de la hauteur dominante ou encore du DHP moyen de la placette.

3.1.3 Monospécifique et multi stade évolutif

Par définition, un modèle est dit monospécifique s'il ne s'intéresse qu'à une seule espèce. De plus, il sera dit multi stade évolutif s'il ignore le stade d'évolution ou encore s'il en tient compte en incorporant dans les équations un indicateur des stades évolutifs. C'est l'approche que nous comptons privilégier. Il en résulte autant d'équations qu'il y a d'essences importantes dans les peuplements considérés.

3.1.4 Monospécifique et mono stade évolutif

Ce type de modèle ressemble au modèle spécifié au cas précédent mais le nombre d'équations est multiplié par le nombre de stades évolutifs considérés. C'est une approche exigeante à gérer puisque l'on peut considérer que chaque placette a atteint un certain niveau d'évolution. À la limite, il est possible de prétendre que ce dernier est différent d'une date de mesure à l'autre. Dans une telle circonstance, les coûts de sondage s'élèvent énormément car il devient difficile d'estimer les coefficients d'une équation de régression avec moins d'une dizaine de données par essence.

3.1.5 Modèle global ou local

Un modèle est qualifié de global s'il s'intéresse à toute l'aire de distribution d'une essence donnée. Par opposition, on le dit « local » s'il ne s'intéresse qu'à une faible partie de l'aire de distribution, donc, à la limite, la surface d'une placette échantillon. Présentement, nous avons mesuré la hauteur de 12 bouleaux jaunes et de 12 résineux dans chaque placette. Dans une étude subséquente, il sera intéressant de constater si une approche aussi exigeante conduit à des résultats plus précis par rapport à l'approche que nous comptons privilégier.

3.1.6 Modèle local « essence - placette - instantané »

Lorsque le modèle local est utilisé à son niveau limite et sur une base temporelle, on obtient une variante (type de modèle) qui peut être qualifiée d'instantanée. Cette méthode se montre la plus précise mais comporte de nombreux désavantages :

1. elle nécessite la mesure de la hauteur de pratiquement toutes les tiges d'une placette à composition mélangée. À la limite, si tous les arbres sont mesurés, on n'a plus besoin de régression pour estimer la hauteur en fonction du DHP;
2. elle nécessite l'estimation des coefficients d'au moins deux régressions par placette dans le cas des peuplements mélangés, une pour chacune des essences principales;

3. pour les essences marginales, les effectifs dans la placette deviennent insuffisants pour estimer les coefficients des équations au niveau de la placette avec une certaine robustesse;

4. les équations déterminées ne sont valables qu'instantanément. Comme la forme de la courbe varie dans le temps, on ne devrait théoriquement pas utiliser cette équation dont les paramètres sont estimés à une mesure donnée pour prédire la hauteur lors de mesures antérieures ou postérieures.

Afin de pallier à ces inconvénients, nous posons l'hypothèse que l'ajout d'une variable explicative supplémentaire serait suffisante. Cette variable devrait être :

1. mesurable facilement au niveau de la placette;
2. représentative du stade évolutif de la placette;
3. indicative du niveau de qualité de la station;
4. valable et représentative pour toutes les essences d'une placette.

Dans le but d'obtenir un modèle monospécifique et multi stade évolutif, nous avons essayé la covariable HDO, c'est-à-dire la hauteur dominante de la placette. La hauteur dominante est définie comme étant la hauteur moyenne des 100 plus grosses tiges par hectare. Pour une placette de 0,04 hectare, on se limite donc qu'aux quatre plus grosses tiges. Les résultats obtenus sont montrés à la section 3.6 apparaissant à la page 108.

Dans le cas des inventaires par placettes temporaires, les données concernant la hauteur individuelle des trois arbres-échantillons (arbres études) sont recueillies selon une procédure qui rend complexe le calcul de la hauteur dominante. Nous sommes donc obligés d'utiliser des variables supplémentaires pour estimer la hauteur dominante de la placette (HDO), toutes essences confondues. Nous verrons dans la section 3.5, une méthode pour estimer cette dernière à partir du peu de données dendrométriques disponibles dans les placettes temporaires. Dans la prochaine section, nous nous attarderons à des relations « Hauteur-DHP » monospécifiques et élémentaires qui ne tiennent pas compte du stade évolutif. Dans un premier temps, on négligera aussi la variable HDO. Par contre, elle sera considérée par la suite et retenue pour l'ensemble de notre modélisation.

3.2 Estimation de la hauteur individuelle au moyen d'un modèle de régression linéaire

Au Québec, lors des compilations d'inventaire forestier, un modèle d'équation du second degré dont les coefficients sont linéaires, est utilisé pour décrire la relation allométrique entre la variable hauteur (H) et sa variable explicative, le DHP. Le modèle d'équation du second degré se présente sous la forme de :

$$H = \beta_1 + \beta_2 \text{DHP} + \beta_3 \text{DHP}^2 + \varepsilon \quad (3.1)$$

Les coefficients linéaires de ce modèle sont généralement estimés pour chacune des essences importantes et pour chaque zone d'inventaire.

Nous avons utilisé le même modèle pour démontrer graphiquement que, parfois, ces équations élémentaires produisent des résultats biologiquement inacceptables. La valeur de chacun des coefficients par essence ou groupe d'essences, de même que le niveau de signification, se trouvent au tableau 3.1. Les résultats d'analyse de la variance apparaissant au tableau 3.2 indiquent que les variances sont élevées, surtout pour le groupe « Bouleau jaune ». Ces résultats sont illustrés dans les figures 3.1 à 3.5. Sur la figure 3.5, le sigle RES signifie l'ensemble des essences résineuses sauf le thuya occidental. On y constate que pour un DHP donné, la variable hauteur présente une grande amplitude de valeurs observées. On s'aperçoit également que les hauteurs prédites culminent pour tous les groupes, lorsque le DHP atteint 50 cm. Pour des DHP plus élevés, les hauteurs prédites diminuent, ce qui est biologiquement inacceptable. Dans la prochaine section, nous proposerons une solution à ce problème.

3.3 Estimation de la hauteur individuelle au moyen d'un modèle de régression non linéaire

En vue d'obtenir des prédictions valables de la hauteur même pour des extrapolations, nous posons l'hypothèse qu'un modèle non linéaire s'avère préférable à un modèle linéaire. En effet, de nombreux chercheurs ont recommandé l'utilisation de régressions non linéaires. Arabatzis et Burkhart (1992) ont procédé à l'essai de huit modèles qui ont procuré des résultats intéressants. De leur côté, les chercheurs albertains Huang, Titus et Wiens (1992) ont comparé les performances de 20 modèles non linéaires exprimant la hauteur en fonction du DHP. Tous les modèles ont été ajustés par la méthode des moindres carrés, en notation anglaise « ordinary least squares (OLS) ». L'examen et la comparaison des résidus, la statistique *t* de chacun des coefficients et les graphiques des

résidus standardisés en fonction de la hauteur prédite, démontrent que plusieurs modèles concaves et sigmoïdes peuvent décrire adéquatement les relations « Hauteur-DHP ». De plus, les derniers auteurs (Huang *et al.*) affirment qu'en général les modèles à deux coefficients présentent une statistique *t* significative au niveau de 0,05 pour chacun des paramètres. En se basant sur les graphiques des résidus de Student et les sommes des carrés des résidus pondérées moyennes, les auteurs prétendent que les modèles à trois paramètres performant encore mieux que ceux à deux paramètres. Dans le cas de la fonction 3.2, appelée la fonction logistique modifiée, les auteurs affirment qu'elle accommode plusieurs patrons qui sont habituellement décrits par d'autres fonctions sigmoïdes. La fonction ajuste bien les relations « Hauteur-DHP » et demeure parmi les meilleures fonctions examinées. C'est pour ces raisons que nous l'avons utilisée et nous verrons graphiquement un peu plus loin qu'elle s'adapte pour représenter nos différents groupes de données. L'équation présente la forme suivante :

$$H = 1,3 + \beta_1 / [1 + 1 / (\beta_2 \text{DHP}^{\beta_3})] + \varepsilon \quad (3.2)$$

L'estimation des trois paramètres de ce modèle non linéaire s'avère facile à faire converger et on obtient des sommes de carrés des résidus très faibles. Les coefficients et leur test de signification apparaissent au tableau 3.3. Des tables d'analyse de la variance sont montrées au tableau 3.4. Les figures 3.6 à 3.9 nous indiquent que les prédictions semblent biologiquement acceptables tant pour de très faibles que pour de très forts DHP. Finalement, la figure 3.10 montre la comparaison entre les trois différents groupes. On y constate la grande flexibilité du modèle.

Le modèle (3.2) semble donc structuré de façon à permettre des extrapolations vraisemblables en dehors de l'ensemble des valeurs observées.

3.4 Comparaison entre les modèles de régression linéaire et non linéaire

Au début de la section précédente, nous avons posé l'hypothèse que les modèles non linéaires sont plus performants que les modèles linéaires pour représenter la relation « Hauteur-DHP ». Les figures 3.11 et 3.12 illustrent bien que cette hypothèse se confirme. En effet, dans le cas de la cohorte des bouleaux jaunes, les résultats de la régression linéaire semblent erratiques à l'exception de ceux apparaissant dans trois zones de DHP étroites (de 6 à 12 cm, de 22 à 32 cm et de 50 à 57 cm). Dans le cas de la cohorte des résineux, le modèle linéaire produit des

Tableau 3.1. Coefficients des régressions linéaires pour l'estimation de la hauteur en fonction du DHP

Groupe : bouleau jaune

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	5,070515	0,266507	19,0258	0,0000
DHP	β_2	0,630625	0,020557	30,6765	0,0000
DHP ²	β_3	-0,006557	0,000349	-18,7865	0,0000

Groupe : résineux sans thuya occidental

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,903035	0,257803	3,5028	0,0005
DHP	β_2	0,870574	0,022049	39,4842	0,0000
DHP ²	β_3	-0,008403	0,000415	-20,2280	0,0000

Groupe : thuya occidental

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	2,272743	0,582508	3,9017	0,0001
DHP	β_2	0,561908	0,038628	14,5467	0,0000
DHP ²	β_3	-0,004442	0,000597	-7,4456	0,0000

Groupe : toutes essences confondues

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	3,218708	0,192124	16,7533	0,0000
DHP	β_2	0,719957	0,015306	47,0381	0,0000
DHP ²	β_3	-0,007380	0,000266	-27,7811	0,0000

Tableau 3.2. Tables d'analyse de la variance des régressions linéaires pour l'estimation de la hauteur en fonction du DHP

Groupe : bouleau jaune

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	14248,2	2	7124,11	1098,93	0,0000
Erreur	6878,25	1061	6,48280		
Total (Corr.)	21126,5	1063			
$R^2 = 0,6744$					

Groupe : résineux sans thuya occidental

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	20746,4	2	10373,2	2131,48	0,0000
Erreur	5105,13	1049	4,86666		
Total (Corr.)	25851,5	1051			
$R^2 = 0,8025$					

Groupe : thuya occidental

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	2339,74	2	1169,87	372,25	0,0000
Erreur	518,553	165	3,14275		
Total (Corr.)	2858,30	167			
$R^2 = 0,8186$					

Groupe : toutes essences confondues

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	36064,5	2	18032,2	2711,20	0,0000
Erreur	15171,0	2281	6,65102		
Total (Corr.)	51235,5	2283			
$R^2 = 0,7039$					

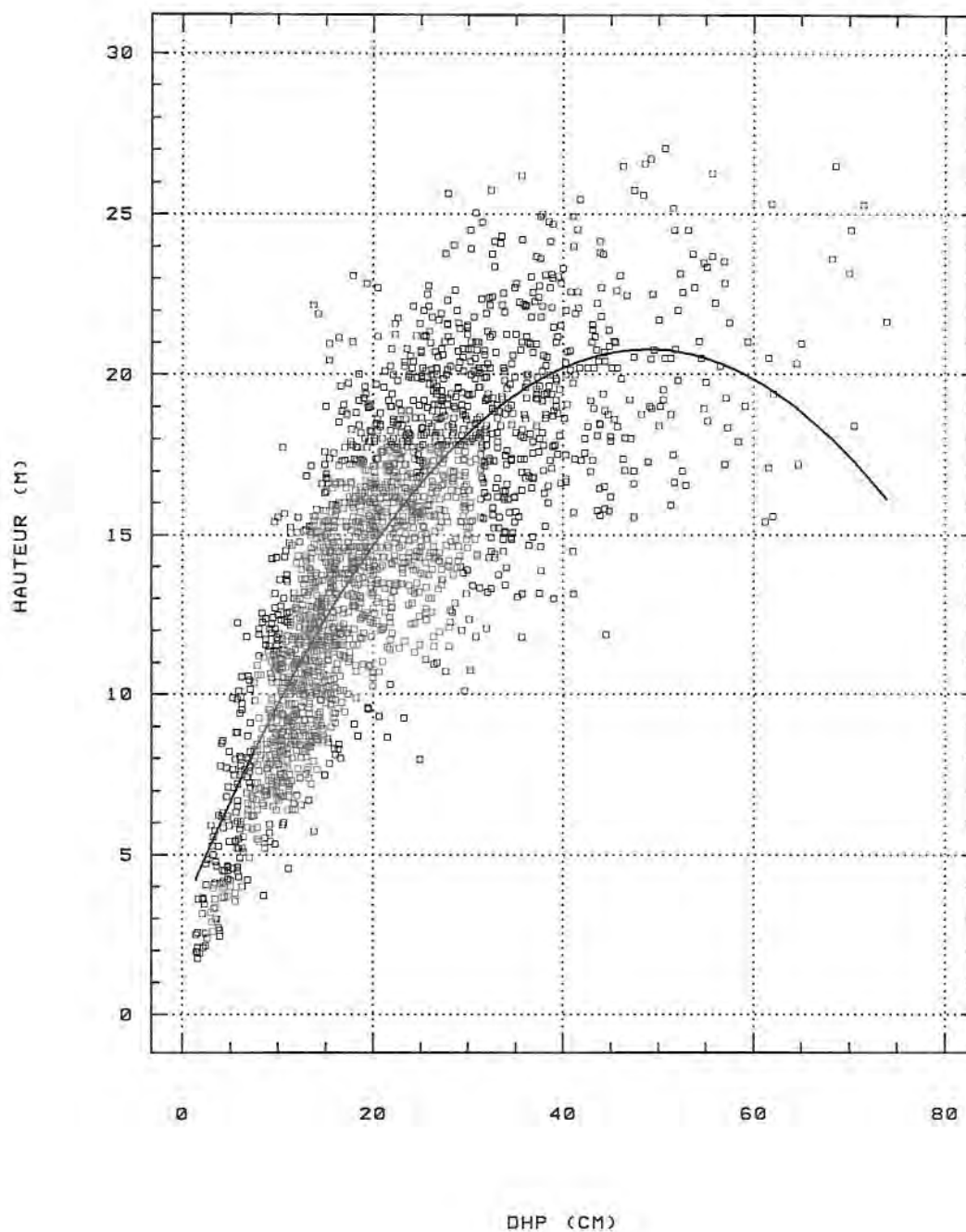


Figure 3.1. Données de base et ajustement d'une équation linéaire du second degré exprimant la hauteur en fonction du DHP pour les bouleaux jaunes.

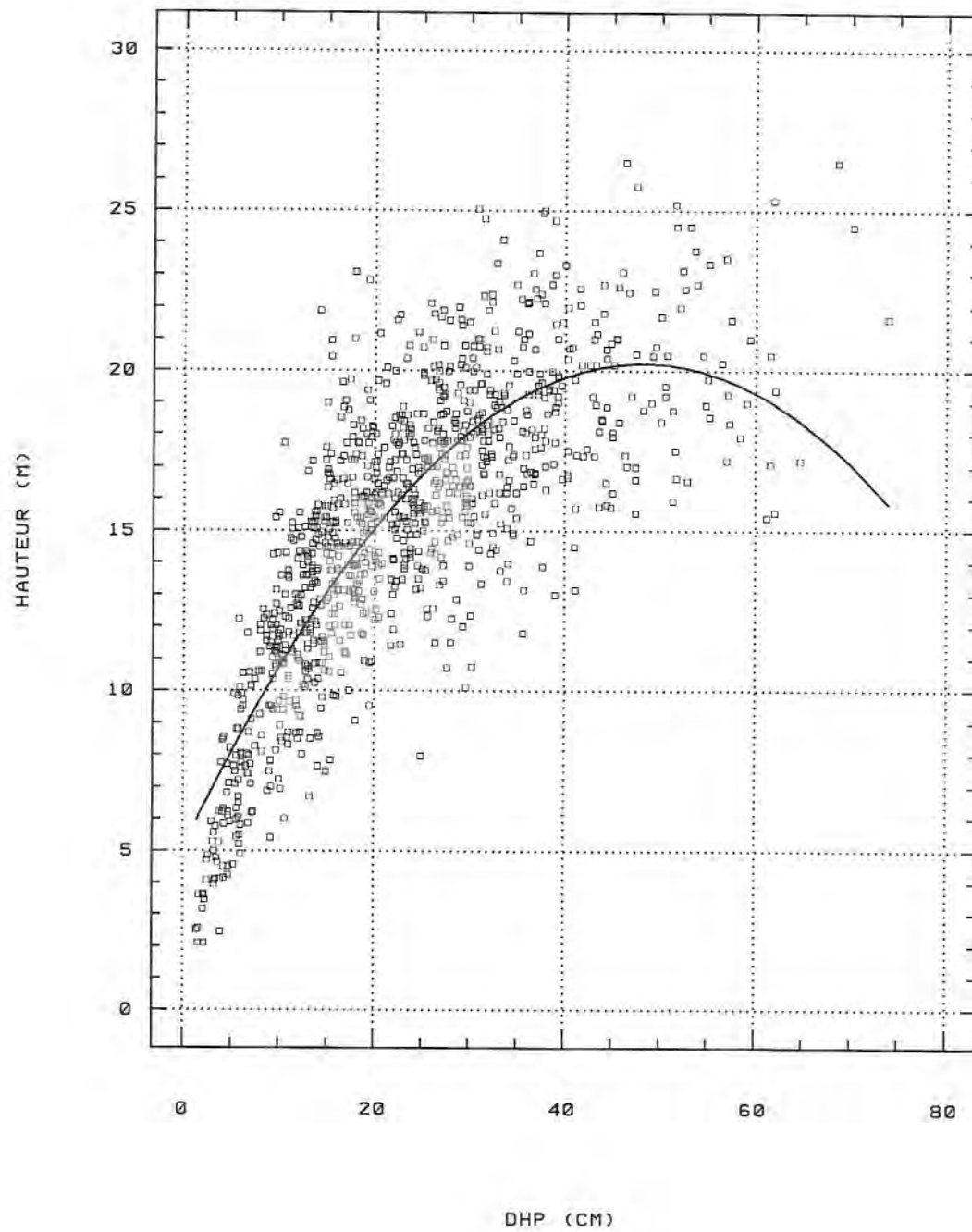


Figure 3.2. Données de base et ajustement d'une équation linéaire du second degré exprimant la hauteur en fonction du DHP pour les résineux sauf le thuya occidental.

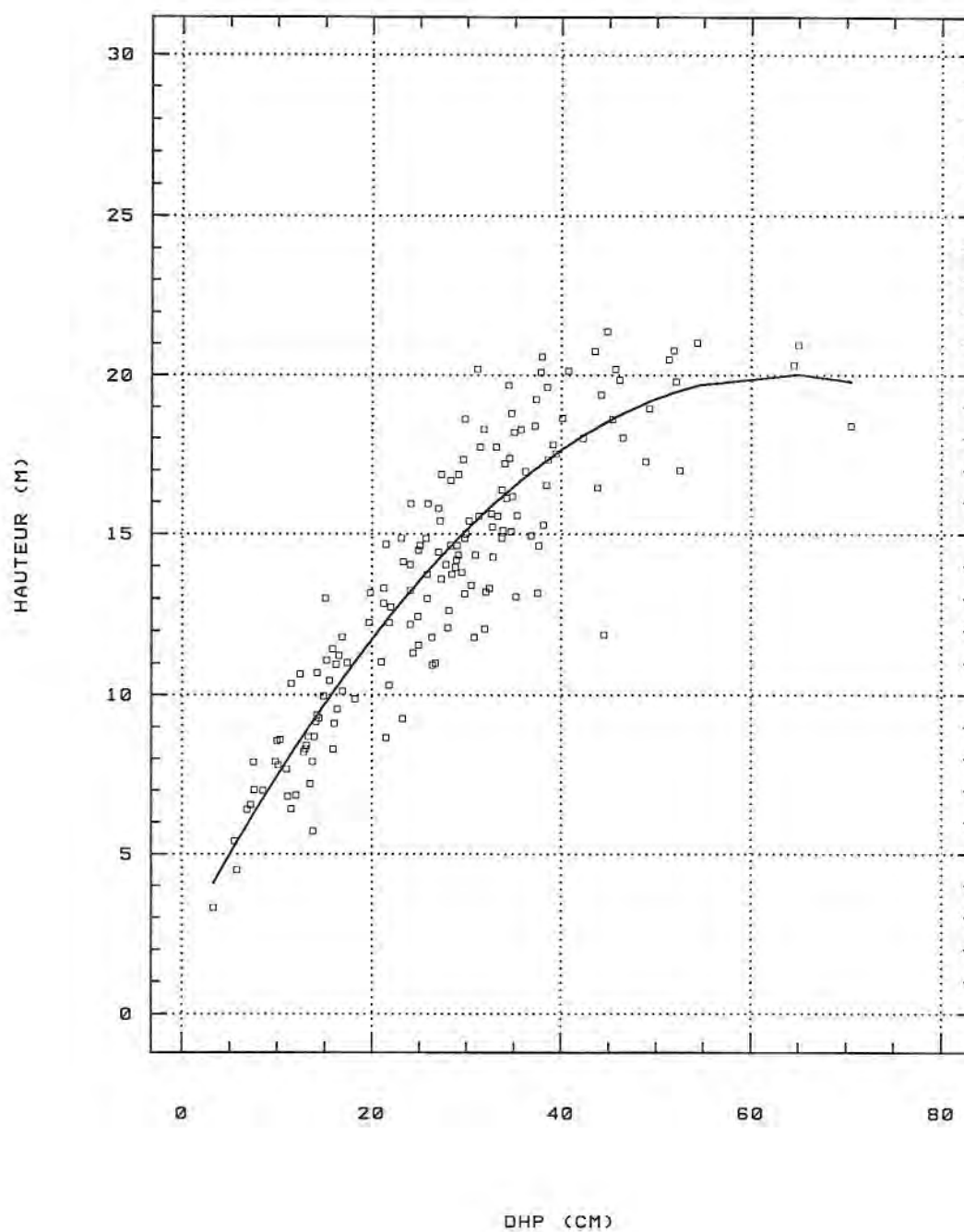


Figure 3.3. Données de base et ajustement d'une équation linéaire du second degré exprimant la hauteur en fonction du DHP pour les thuyas occidentaux.

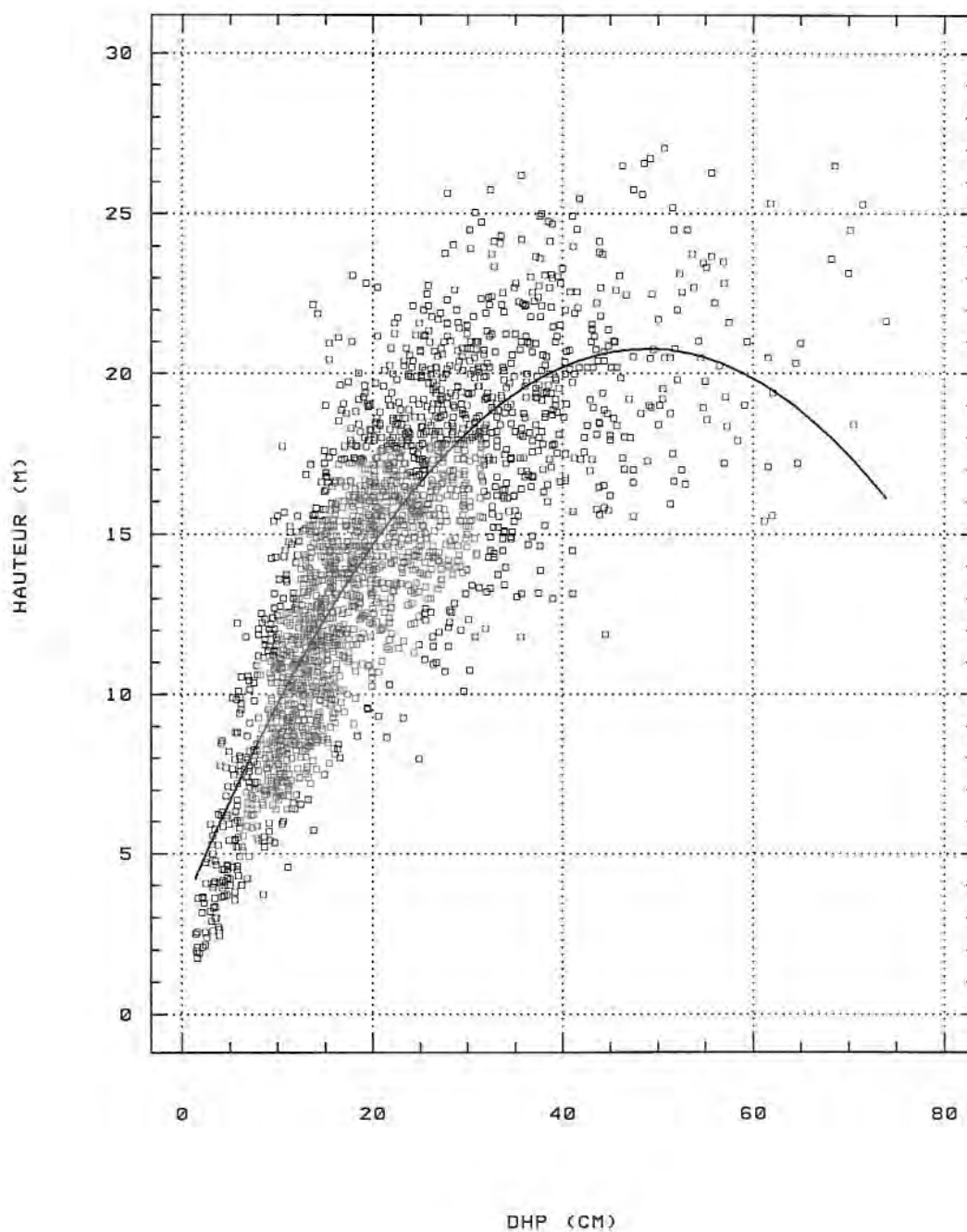


Figure 3.4. Données de base et ajustement d'une équation linéaire de second degré exprimant la hauteur en fonction du DHP, pour toutes les essences confondues dans les bétulaies jaunes à résineux.

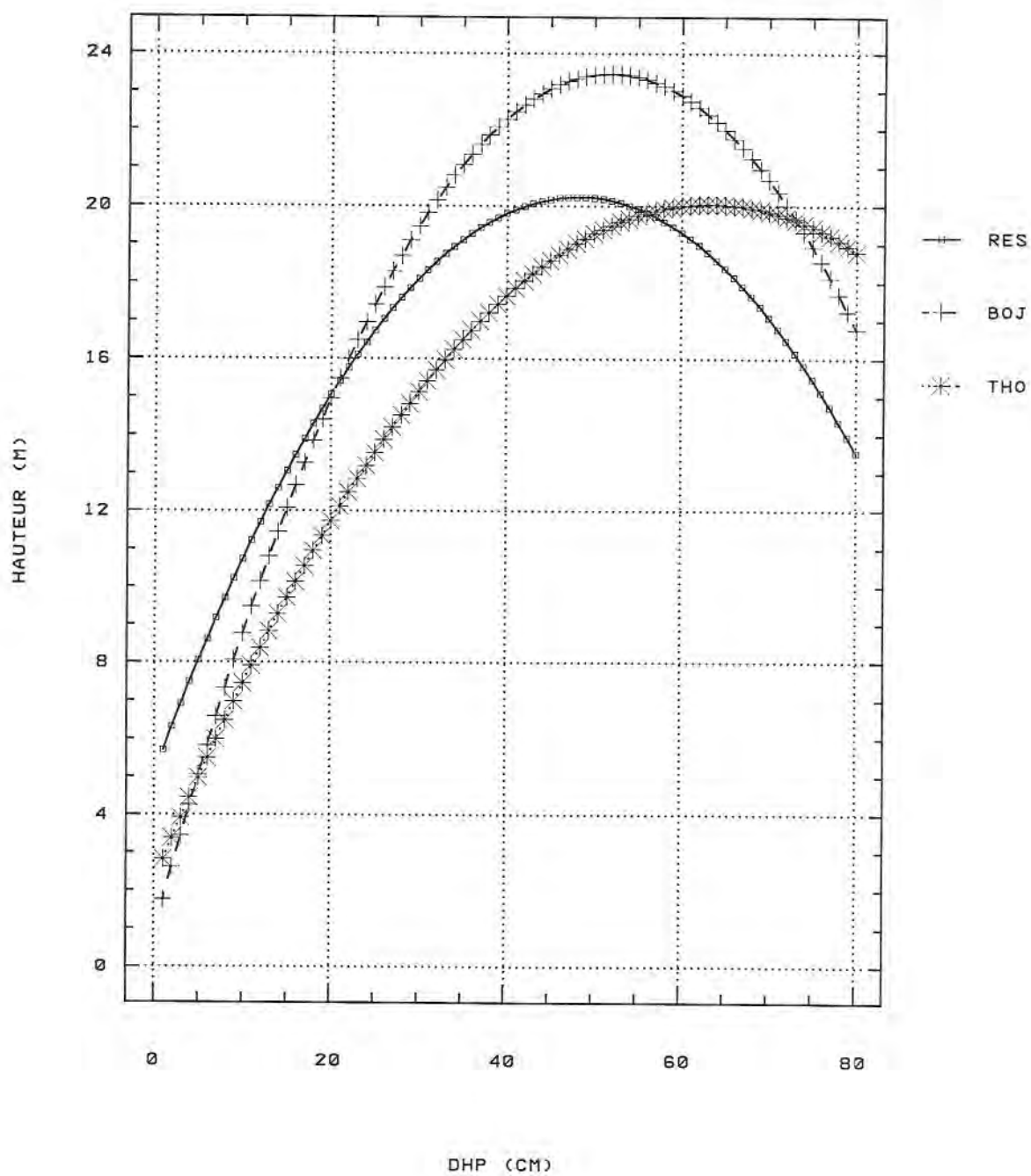


Figure 3.5. Comparaison entre les équations linéaires pour trois groupes différents.

Tableau 3.3. Coefficients des régressions non linéaires pour l'estimation de la hauteur en fonction du DHP

Groupe : bouleau jaune

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	21,7988877	0,71101522	30,6588
β_2	0,0475002	0,00644228	7,3732
β_3	1,2294444	0,07560018	16,2625

Groupe : résineux sans thuya occidental

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	26,5381904	1,03256769	25,7012
β_2	0,0109574	0,00148675	7,3701
β_3	1,5394199	0,70396220	21,8679

Groupe : thuya occidental

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	28,6250871	4,51947994	6,3337
β_2	0,0198405	0,00477141	4,1582
β_3	1,1316557	0,15130898	7,4791

Groupe : toutes essences confondues

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	22,6587304	0,55607729	40,7474
β_2	0,0232690	0,00257769	9,0271
β_3	1,4003167	0,05701001	24,5626

Tableau 3.4. Tables d'analyse de la variance des régressions non linéaires pour l'estimation de la hauteur en fonction du DHP

Groupe : bouleau jaune

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	259580,98	3	86526,99	14616,54
Erreur	6280,9084	1061	5,9198	
Total	265861,89	1064		
Total (Corr.)	21126,467	1063		
$R^2 = 0,7027$				

Groupe : résineux sans thuya occidental

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	214410,30	3	71470,10	15042,49
Erreur	4984,0238	1049	4,7512	
Total	219394,32	1052		
Total (Corr.)	25851,539	1051		
$R^2 = 0,8072$				

Groupe : thuya occidental

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	34584,313	3	11528,104	355582
Erreur	534,93707	165	3,24204	
Total	35119,250	168		
Total (Corr.)	2858,2968	167		
$R^2 = 0,8128$				

Groupe : toutes essences confondues

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	505852,16	3	168617,39	26482,70
Erreur	14523,304	2281	6,367	
Total	520375,47	2284		
Total (Corr.)	51235,466	2283		
$R^2 = 0,7165$				

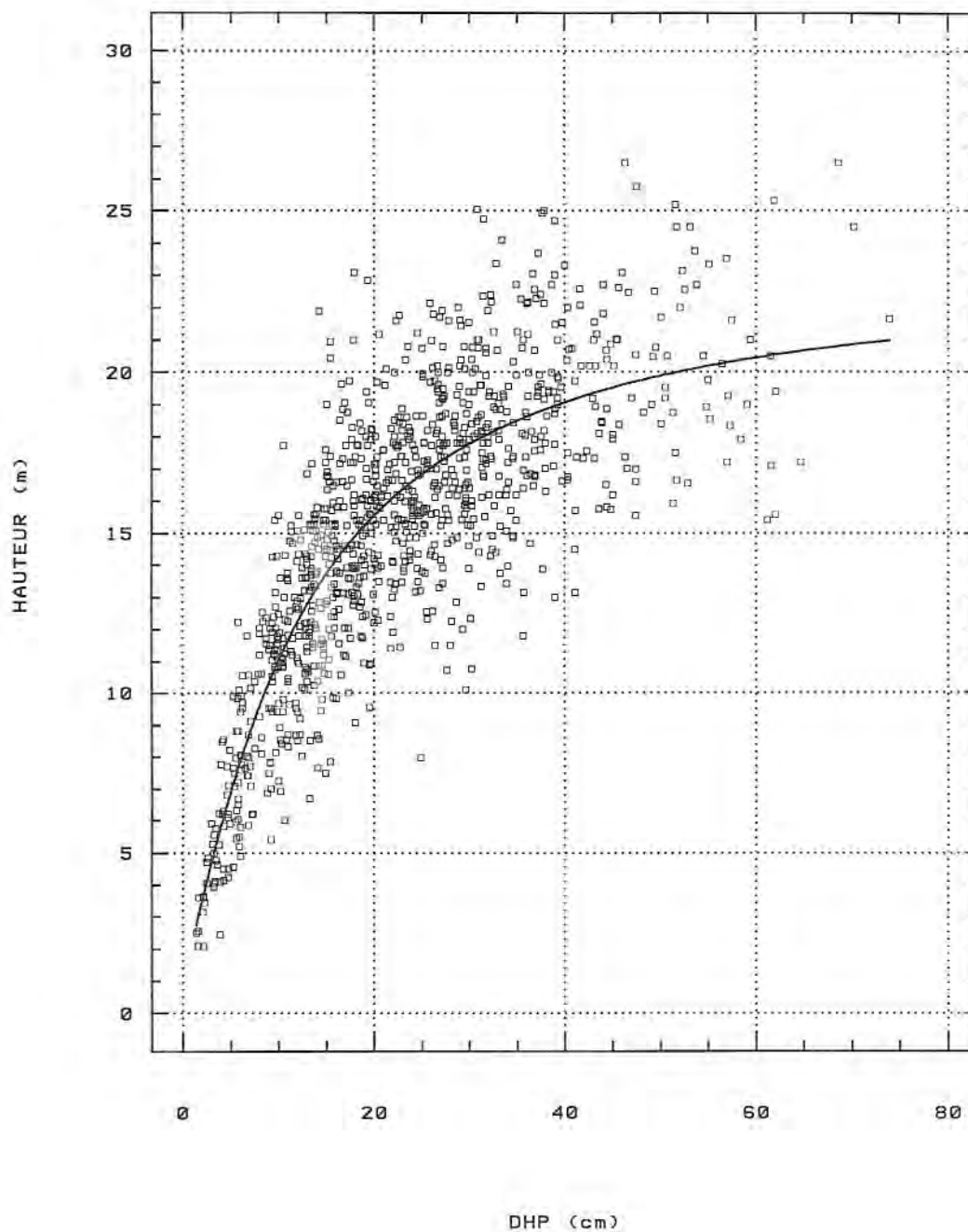


Figure 3.6. Données de base et ajustement de la régression non linéaire exprimant la hauteur en fonction du DHP pour les bouleaux jaunes.

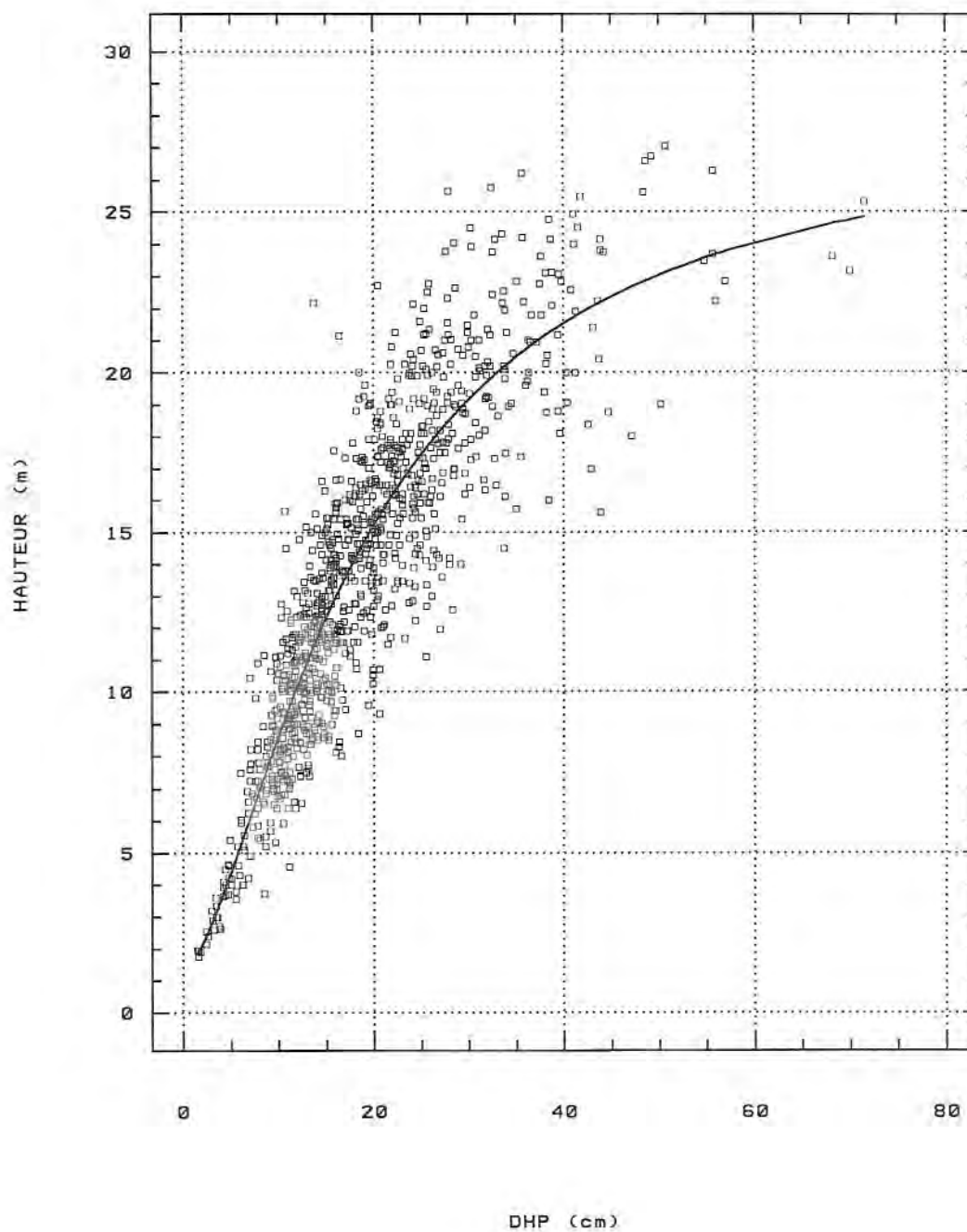


Figure 3.7. Données de base et ajustement de la régression non linéaire exprimant la hauteur en fonction du DHP pour les résineux sauf les thuyas occidentaux.

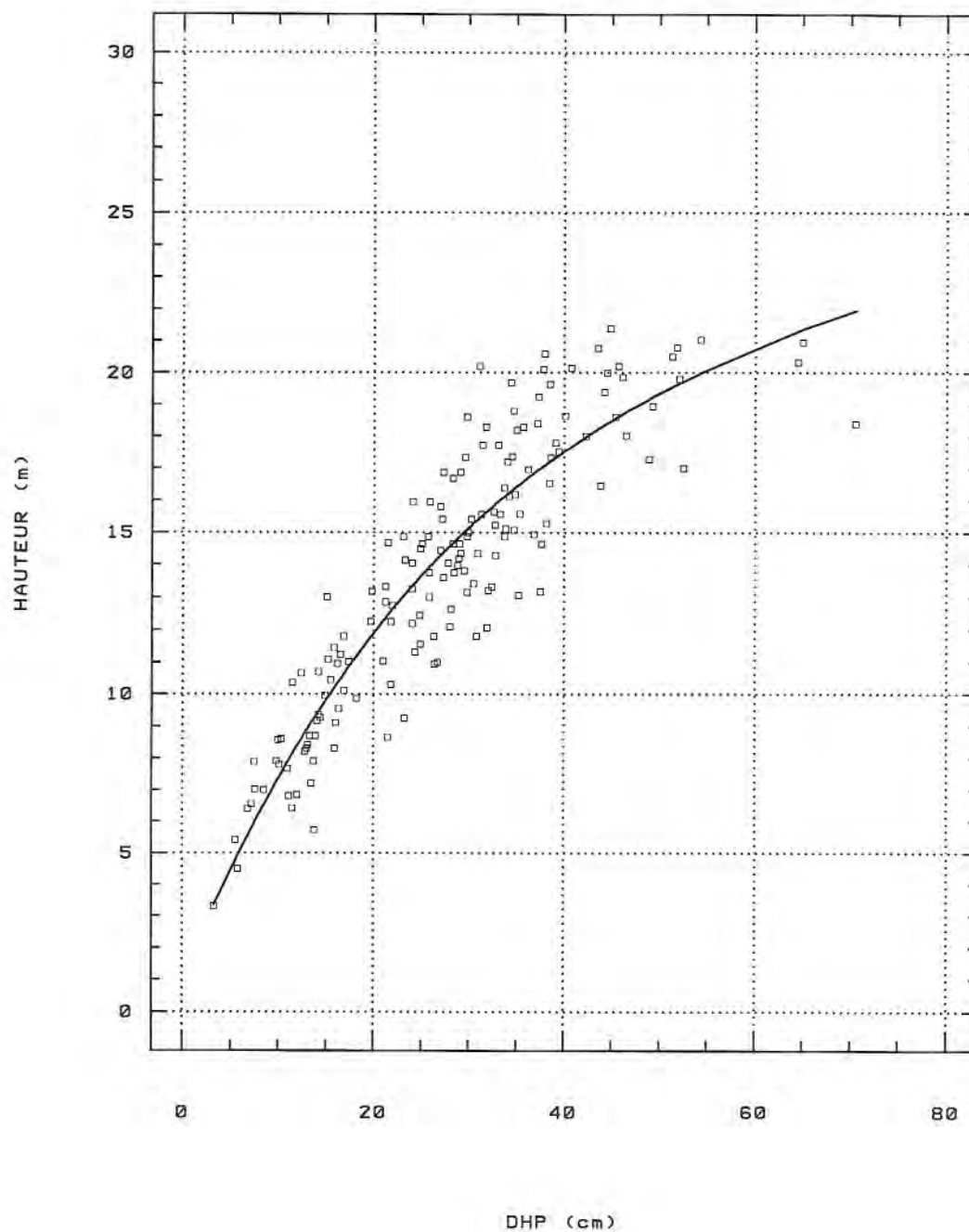


Figure 3.8. Données de base et ajustement de la régression non linéaire exprimant la hauteur en fonction du DHP pour les thuyas occidentaux.

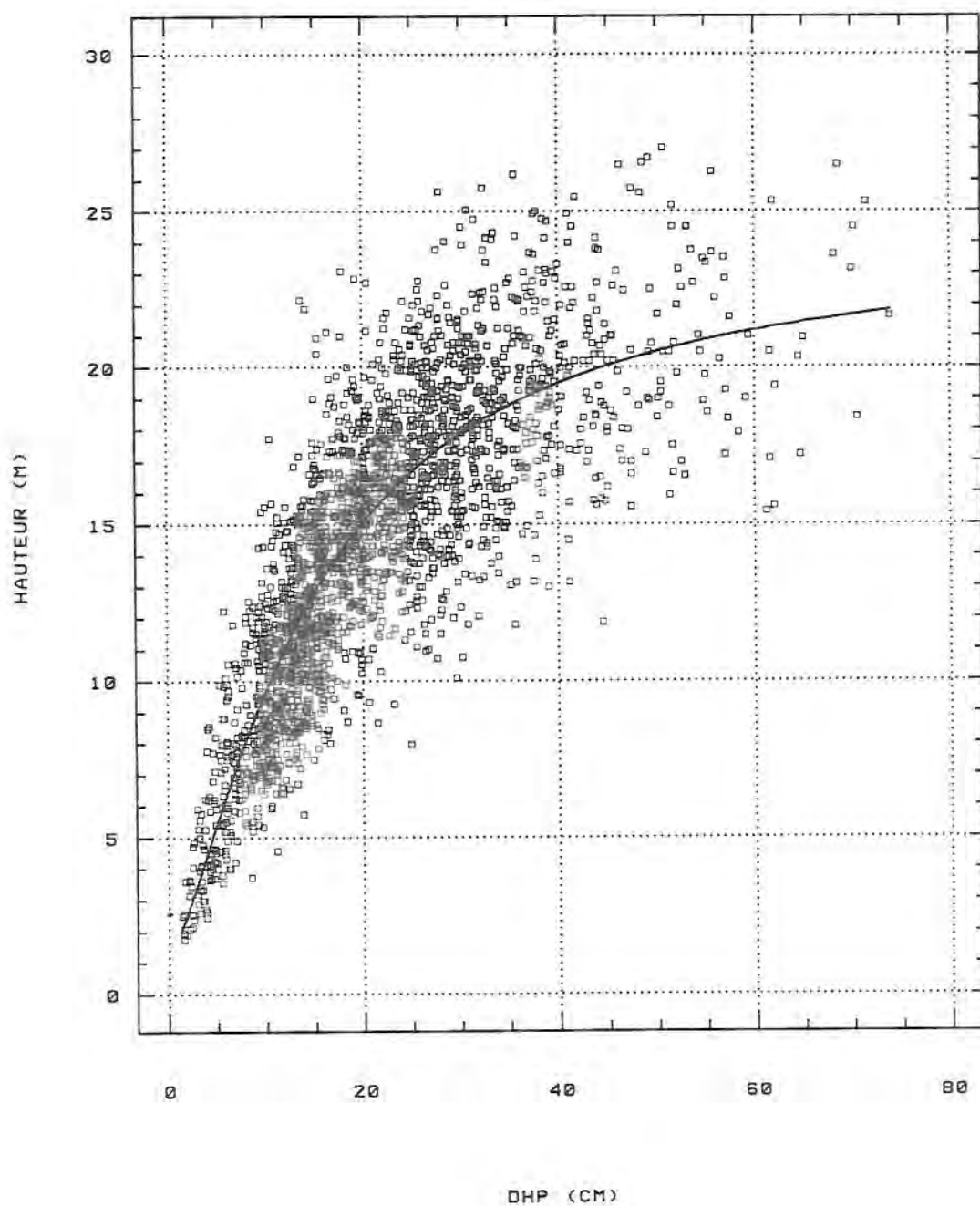


Figure 3.9. Données de base et ajustement de la régression non linéaire exprimant la hauteur en fonction du DHP pour toutes les essences confondues dans les bétulaies jaunes à résineux.

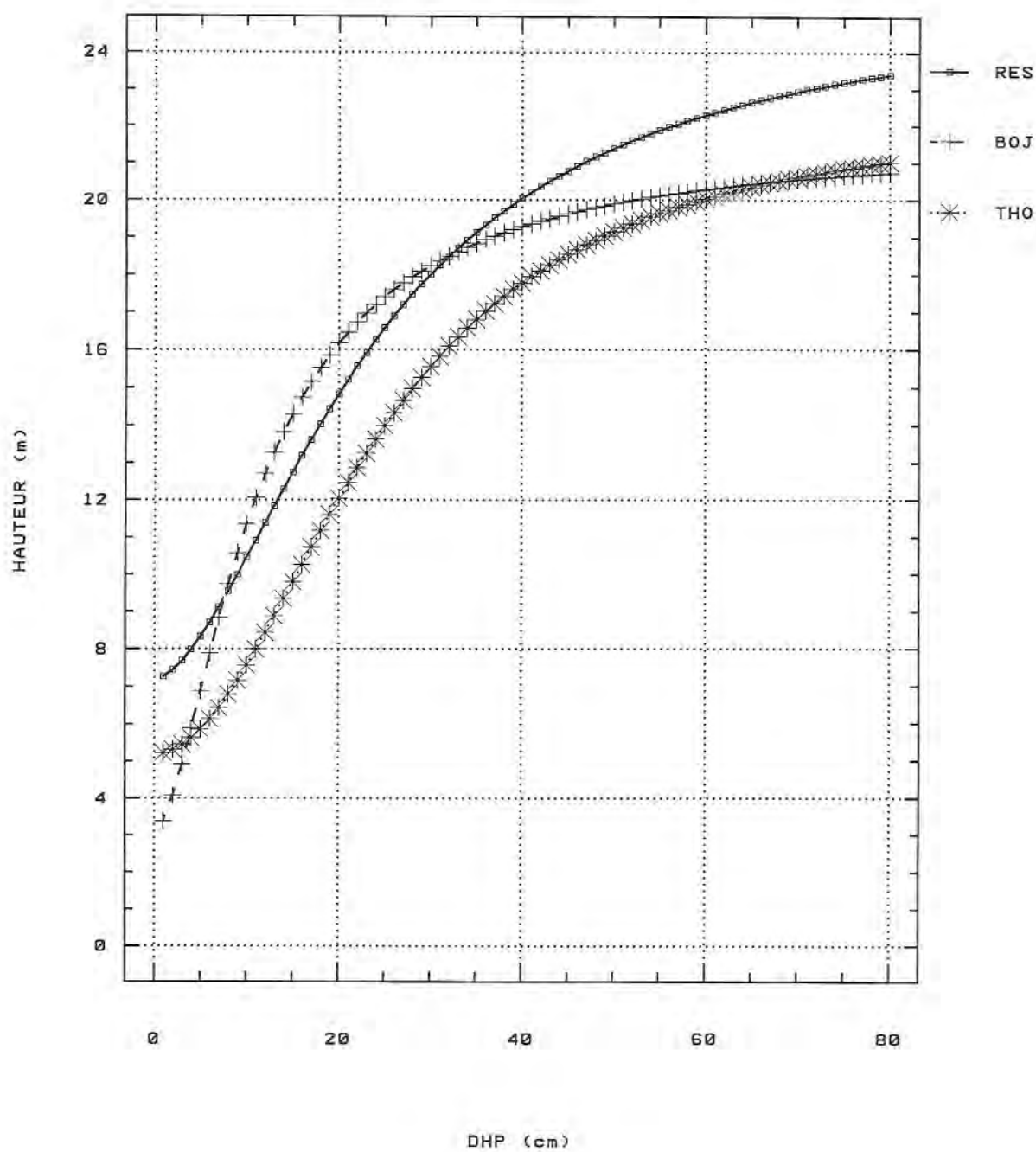


Figure 3.10. Comparaison entre les prédictions des régressions non linéaires pour trois groupes différents.

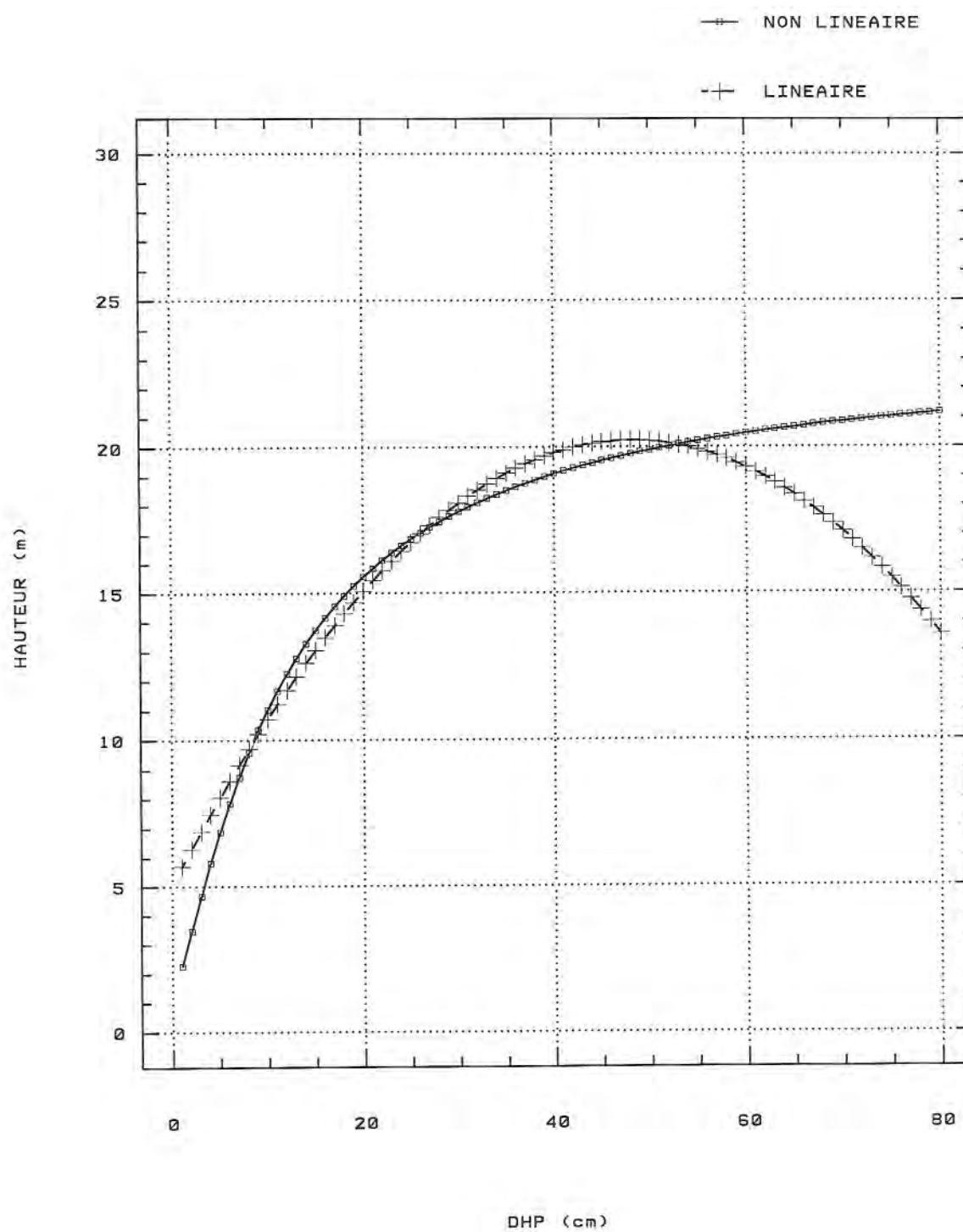


Figure 3.11. Comparaison entre la régression linéaire et non linéaire pour estimer la hauteur du bouleau jaune en fonction du DHP.

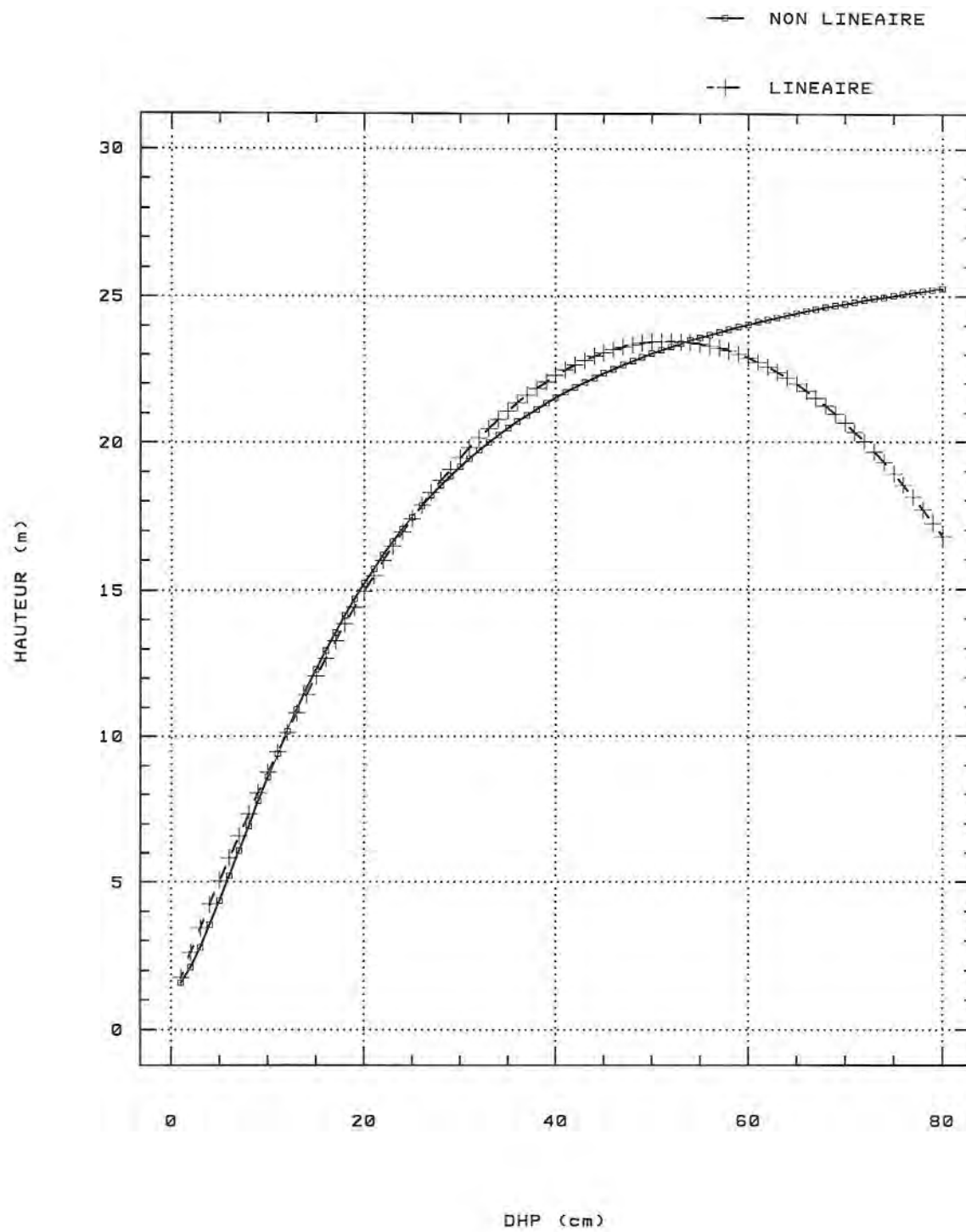


Figure 3.12. Comparaison entre la régression linéaire et non linéaire pour estimer la hauteur de la cohorte résineuse.

résultats acceptables pour des valeurs de DHP entre 10 et 30 cm, l'incohérence des prédictions apparaît à l'extérieur de cet intervalle.

Aussi, il est réconfortant de rappeler que les courbes de prédiction du modèle non linéaire s'ajustent bien aux nuages de points qui se trouvent aux figures précédentes 3.6 à 3.9. De plus, pour des extrapolations à de grands DHP, la forme asymptotique des courbes est conforme aux concepts de croissance reconnus dans le domaine. Nous prétendons que le modèle non linéaire (3.2) devrait remplacer le modèle linéaire du second degré (3.1) actuellement utilisé lors des compilations d'inventaire au Québec. En outre, il existe aujourd'hui de nombreux logiciels statistiques qui permettent d'estimer aisément les valeurs des coefficients de modèles non linéaires.

3.5 Estimation de la hauteur dominante lorsqu'elle n'est pas mesurée sur le terrain

Lors des inventaires forestiers conventionnels au Québec, il n'est pas coutume de mesurer la hauteur individuelle des 100 plus grosses tiges par hectare. Compte tenu des dimensions de nos placettes, on devrait mesurer les quatre plus grosses tiges par placette car leur superficie est de 0,04 hectare. On mesure plutôt la hauteur des trois tiges les plus proches du centre de la placette temporaire, qui répondent aux critères suivants :

1. dominante ou codominante
2. appartenant à l'essence principale
3. DHP semblable au DHP moyen des tiges de l'essence principale.

En général, les tiges ainsi sélectionnées possèdent des tailles plus faibles que celles qui devraient être mesurées pour répondre parfaitement à la définition de la hauteur dominante. Lors de ces observations d'arbres, les sondeurs inscrivent, entre autres, l'étage, le DHP et la hauteur totale. De ces variables et de l'ensemble des DHP mesurés sur les tiges marchandes de la placette, il devient possible de construire un ensemble de variables synthétiques particulièrement utiles pour estimer la hauteur dominante par l'intermédiaire d'un modèle de régression linéaire multiple. On cherche donc, à partir du peu d'information disponible dans les placettes temporaires, à y estimer la hauteur dominante pour toutes les essences confondues dans chacune des placettes. Pour y arriver, nous avons mesuré environ 24 tiges dans chacune des placettes

permanentes visitées depuis le début de l'étude. Les données brutes ont été traitées avec le programme d'analyse *H94BATCH* présenté dans un rapport interne de la DRF (Carpentier 1995). Ce programme estime avec précision la hauteur dominante toutes essences confondues pour chacune des placettes. Le programme construit également, pour chaque essence, une matrice contenant la variable dépendante (HDO) pour toutes les essences, et les variables explicatives (régresseurs) « arbre individuel » et « placette » correspondantes. Par variables « arbre », on entend les variables H, RDHP et ÉTAGE qui peuvent prendre des valeurs différentes d'une tige à l'autre. Par variable « placette », on entend les variables hauteur dominante (HDO) et DHP dominant (DHPDO) qui prennent des valeurs identiques pour toutes les tiges d'une même placette. En élaborant cette matrice, les tiges intermédiaires et supprimées qui ne correspondent pas aux critères de sélection des arbres-échantillons dans les normes des placettes temporaires (Perron *et al.* 1994a) ont été rejetées.

Les variables explicatives (régresseurs) disponibles ont été soumises à une sélection de type « par étape » et le modèle de régression multiple retenu est le suivant :

$$HDO = \beta_1 + \beta_2 H + \beta_3 RDHP + \beta_4 \text{ÉTAGE} + \beta_5 DHPDO + \varepsilon \quad (3.3)$$

où

- HDO : hauteur dominante en mètres, toutes essences confondues d'une placette;
- H : hauteur totale en mètres de l'arbre-échantillon (dominante ou codominante);
- RDHP : rapport du DHP de l'arbre-échantillon sur le DHP dominant (DHPDO) de la placette;
- ÉTAGE : variable dichotomique dont les codes 1 et 2 correspondent respectivement à dominant et à codominant;
- DHPDO : diamètre dominant en cm correspondant à la moyenne quadratique des DHP des quatre plus grosses tiges de la placette;
- β_i : coefficients de la régression linéaire multiple, $i = 1, \dots, 5$;
- ε : terme d'erreur.

Tableau 3.5. Coefficients des régressions pour l'estimation de la hauteur dominante

Groupe : bouleau jaune

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	-1,109399	0,438276	-2,5313	0,0117
H	β_2	0,849006	0,021159	40,1248	0,0000
RDHP	β_3	-0,778076	0,167150	-4,6549	0,0000
ÉTAGE	β_4	2,280351	0,107688	21,1755	0,0000
DHPDO	β_5	0,038191	0,007129	5,3572	0,0000

Groupe : résineux sans thuya occidental

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	-0,155433	0,537800	-0,2890	0,7727
H	β_2	0,803919	0,024871	32,3242	0,0000
RDHP	β_3	-0,860901	0,310422	-2,7733	0,0058
ÉTAGE	β_4	2,158731	0,133021	16,2285	0,0000
DHPDO	β_5	0,041772	0,008584	4,8661	0,0000

Groupe : thuya occidental

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	1,381301	1,156908	1,1940	0,2374
H	β_2	0,601252	0,075016	8,0149	0,0000
RDHP	β_3	0,005430	0,470902	0,0115	0,9908
ÉTAGE	β_4	1,380110	0,246994	5,5876	0,0000
DHPDO	β_5	0,106138	0,020072	5,2877	0,0000

Groupe : toutes essences confondues

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	-0,641444	0,325367	-1,9715	0,0490
H	β_2	0,821906	0,014816	55,4738	0,0000
RDHP	β_3	-0,786748	0,133069	-5,9123	0,0000
ÉTAGE	β_4	2,191280	0,079742	27,4797	0,0000
DHPDO	β_5	0,043137	0,005027	8,5808	0,0000

Tous les coefficients estimés apparaissent au tableau 3.5. S'y retrouvent également les résultats des tests statistiques usuels concernant les coefficients. Il faut remarquer que la variable RDHP n'était pas retenue automatiquement par le logiciel *STATGRAPHICS PLUS VERSION 6.1* dans le cas du groupe « thuya occidental ou *Thuja occidentalis* L. ». Dans le but d'uniformiser la présentation des résultats et de simplifier l'utilisation informatique des équations, nous avons forcé l'introduction de la variable RDHP dans ce groupe, même si elle est peu significative.

Les résultats de ces quatre régressions apparaissent aux figures 3.13 à 3.16 et au tableau 3.6. Sur ce dernier, on constate que les régressions sont très significatives avec des valeurs de la statistique R^2 supérieures à 0,85.

Ces régressions permettent d'obtenir une estimation de la hauteur dominante pour les placettes temporaires même si la hauteur des quatre plus grosses tiges n'est pas mesurée. Toutes les hauteurs mesurées de tiges dominantes ou codominantes sont utilisées quelle que soit l'essence, en vue d'estimer la hauteur dominante (HDO) dans la placette pour toutes les essences; celle-ci représente la moyenne arithmétique des estimés de la hauteur dominante provenant de chacune des trois tiges témoins de la placette temporaire.

3.6 Modélisation de la hauteur individuelle à partir de deux variables explicatives

On a vu précédemment que la variable DHP restait la meilleure variable indépendante pour expliquer les variations de la hauteur des arbres autant pour une placette que pour un ensemble de placettes. Dans ce dernier cas, on peut voir sur les figures 3.6 à 3.9 que la variable DHP ne peut expliquer à elle seule toute la variation constatée. Il faut donc chercher à introduire une deuxième variable explicative capable de traduire l'effet micro-stationnel.

Cette introduction est justifiée par le fait que les placettes proviennent d'un vaste territoire, et que le groupement d'essences présentement à l'étude est capable de s'adapter à des conditions de sols très variables. On peut donc supposer que l'indice de qualité de station et l'indice de densité sont très variables. Ces deux variables ayant un certain effet sur la hauteur dominante, on utilisera cette dernière comme covariable explicative. À partir des données provenant de 94 placettes, nous avons analysé par régression, pour chaque essence, la hauteur individuelle en fonction de la hauteur dominante de la placette (toutes

essences confondues) et du DHP individuel. Nous nous sommes servis, comme modèle de base, de celui déjà utilisé pour la relation « Hauteur-DHP ».

Nous avons introduit la hauteur dominante (HDO) au numérateur du membre droit de l'équation. Ainsi, le numérateur, qui a pour objet de fixer l'asymptote supérieure, peut s'ajuster en fonction de la hauteur dominante. Dans une station riche, la hauteur dominante se trouve supérieure, ce qui signifie que les hauteurs de toutes les tiges de la placette sont également plus hautes que celle d'une placette localisée dans une station pauvre.

Pour améliorer davantage la flexibilité du modèle, nous avons effectué un ajout au modèle en incorporant un exposant à la variable hauteur dominante (HDO). Cet ajout a diminué sensiblement la somme des résidus.

Le modèle d'équation retenu est le suivant :

$$H = f(HDO, DHP) + \varepsilon$$

$$H = 1.3 + \beta_1 HDO^{\beta_2} / [1 + 1/(\beta_3 DHP^{\beta_4})] \quad (3.4)$$

En nous servant des sommes des carrés des résidus apparaissant au tableau 3.4 (page 91) et au tableau 3.9 (page 111), on a construit le tableau 3.7. À la lumière de ce dernier, on peut conclure que l'insertion de la « hauteur dominante (HDO) » calculée à partir des quatre plus grosses tiges de chacune des placettes est moins significative dans les cas des résineux et du thuya occidental que dans le cas du bouleau jaune.

Sur les figures 3.17 à 3.20, on vérifie que la « hauteur dominante » (HDO) explique une certaine proportion de la variance. Dans le cadre des réalisations des variables observées, on constate également que les valeurs prédites sont toujours biologiquement acceptables.

Le tableau 3.8 indique que les tests t de Student sur les coefficients non linéaires de la régression sont, à une exception près, tous significatifs. En effet, toutes les statistiques t sont supérieures à 2,8 à l'exception de celle associée au coefficient β_3 pour le thuya occidental. Au tableau 3.9, on constate que les régressions sont toutes significatives avec des valeurs R^2 supérieures à 0,77 et des valeurs de F supérieures à 3 000. Dans le cas du thuya occidental, il conviendrait d'être prudent lors de l'utilisation de l'équation pour la prédiction de la hauteur individuelle, étant donné la rareté de données disponibles pour la régression.

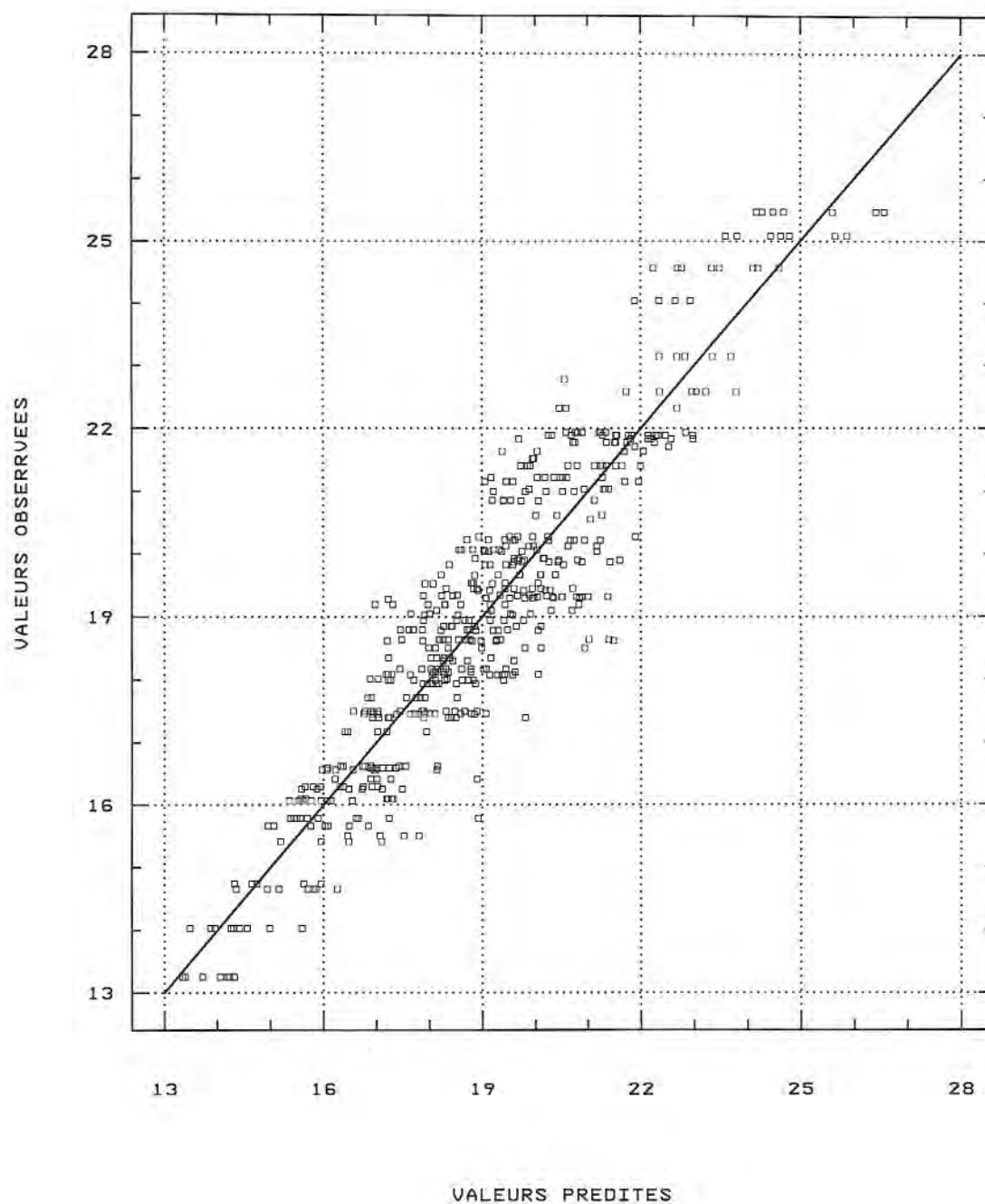


Figure 3.13. Hauteurs dominantes prédites et observées pour toutes les tiges dominantes et codominantes de bouleau jaune.

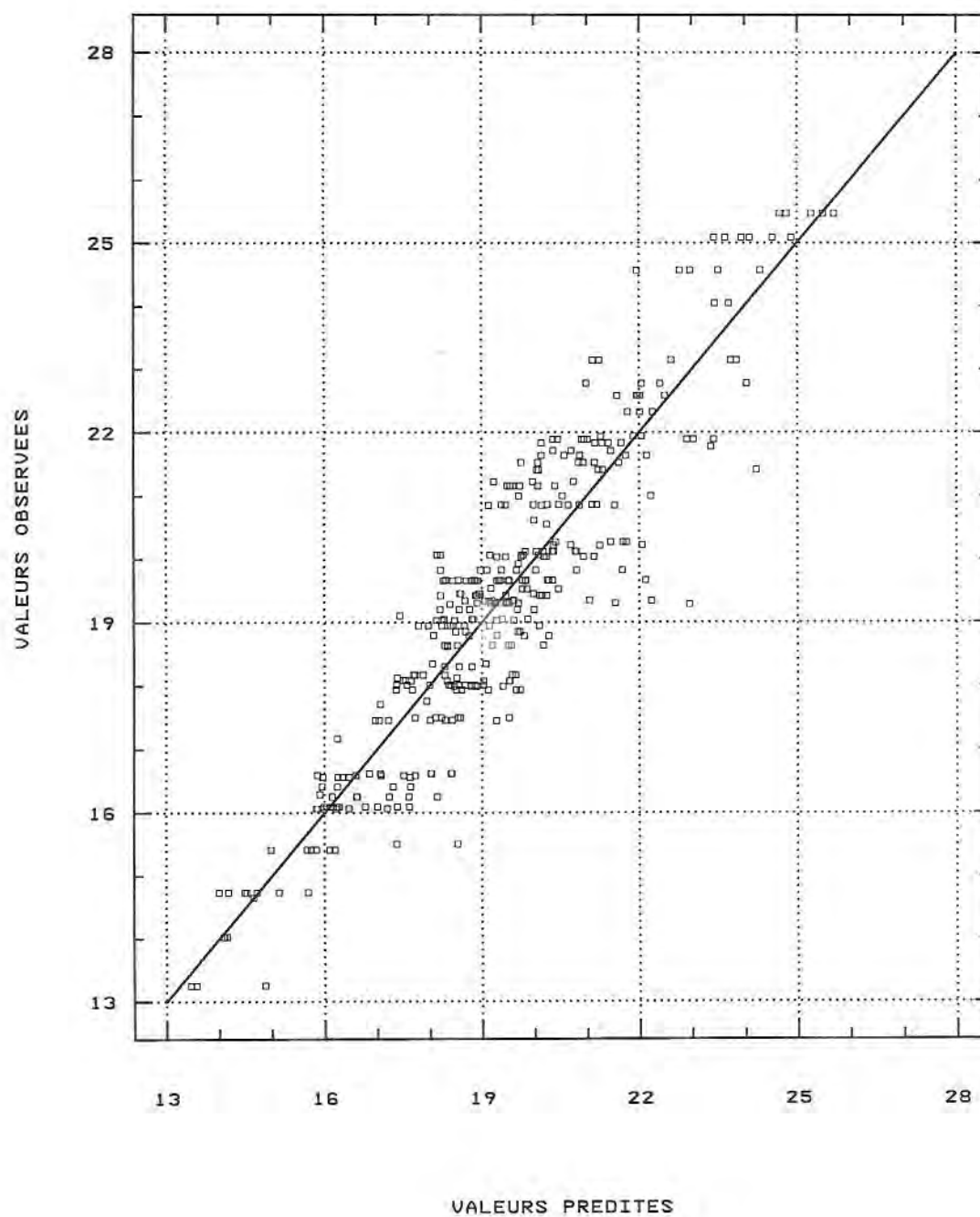


Figure 3.14. Hauteurs dominantes prédites et observées pour toutes les tiges dominantes et codominantes de la cohorte résineuse sans le thuya occidental.

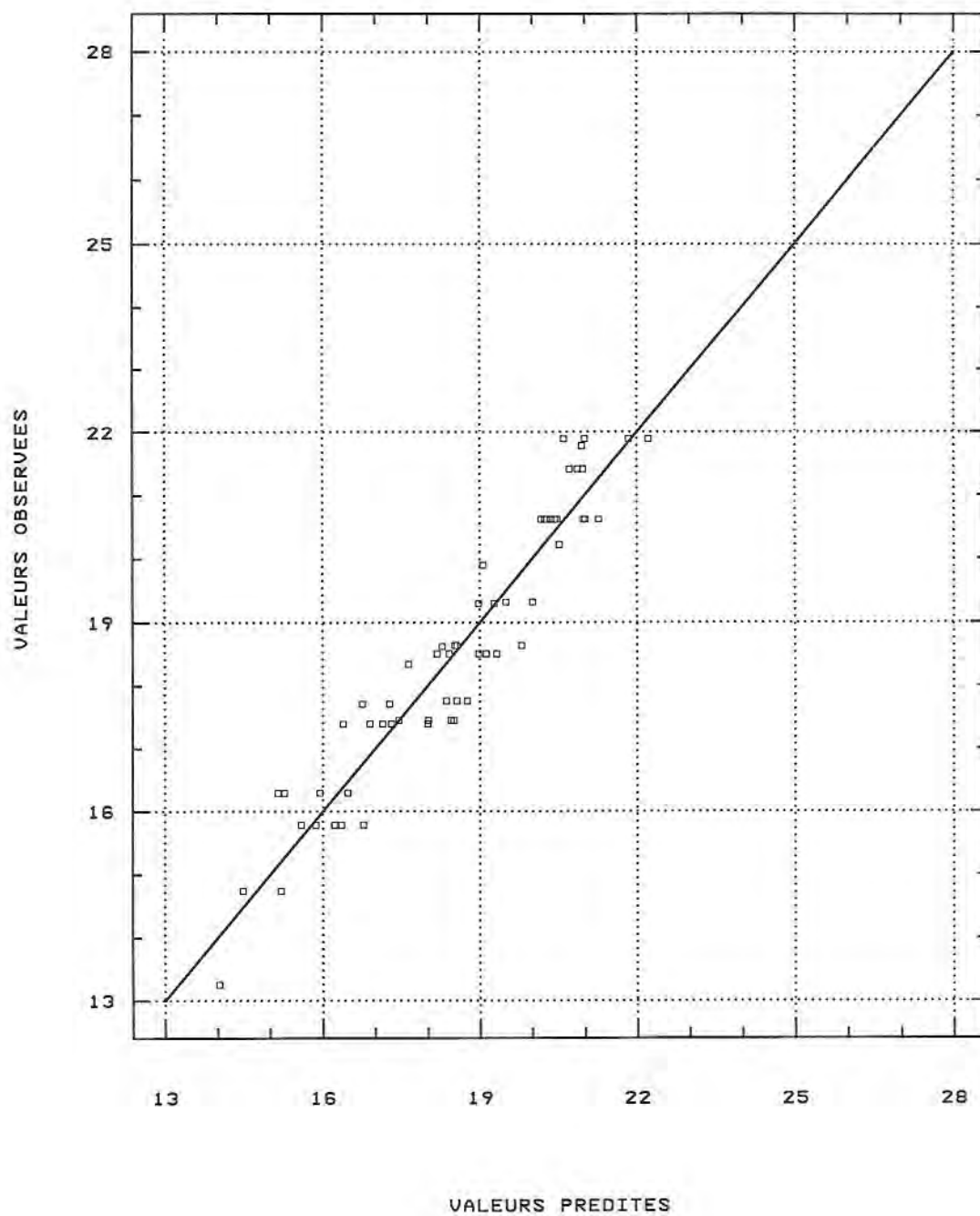


Figure 3.15. Hauteurs dominantes prédites et observées pour toutes les tiges dominantes et codominantes de thuya occidental.

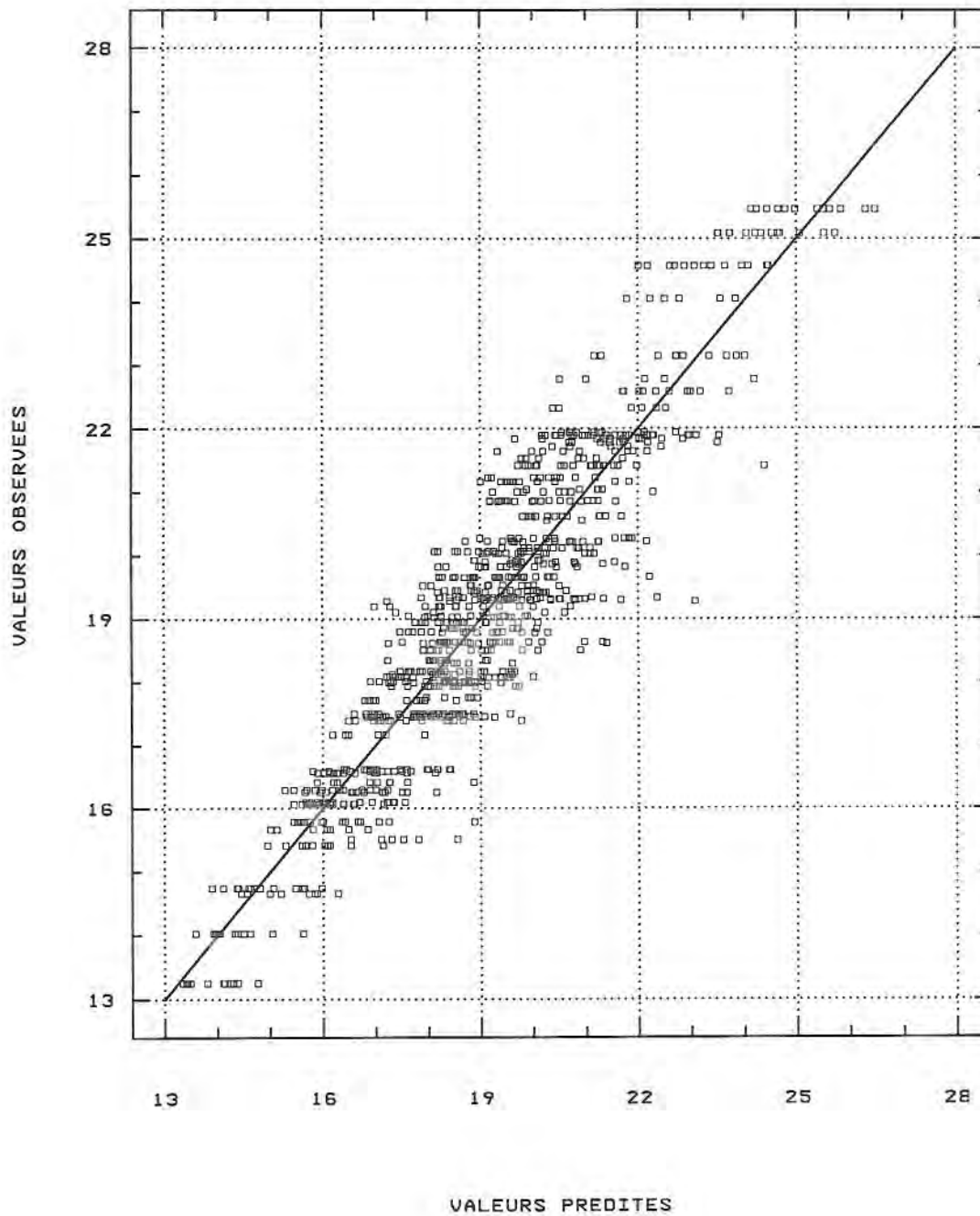


Figure 3.16. Hauteurs dominantes prédites et observées pour toutes les tiges dominantes et codominantes, toutes essences confondues.

Tableau 3.6. Tables d'analyse de la variance des régressions pour l'estimation de la hauteur dominante

Groupe : bouleau jaune

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	2792,50	4	698,124	802,873	0,0000
Erreur	456,505	525	0,869533		
Total (Corr.)	3249,00	529			
$R^2 = 0,8584$					

Groupe : résineux sans thuya occidental

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	1751,85	4	437,963	486,697	0,0000
Erreur	320,353	356	0,899868		
Total (Corr.)	2072,20	360			
$R^2 = 0,8454$					

Groupe : thuya occidental

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	238,702	4	59,6755	146,788	0,0000
Erreur	23,1729	57	0,406542		
Total (Corr.)	261,875	61			
$R^2 = 0,9115$					

Groupe : toutes essences confondues

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	4812,42	4	1203,10	1408,53	0,0000
Erreur	809,738	948	0,854154		
Total (Corr.)	5622,16	952			
$R^2 = 0,8559$					

Tableau 3.7. Impact sur les résidus occasionné par l'introduction de la hauteur dominante (HDO) dans la relation « Hauteur-DHP »

Essences ou groupe d'essences	Variables explicatives		Pourcentage de diminution des résidus
	DHP Résidus *	DHP et HDO Résidus *	
Bouleau jaune	6 281	4 564	27
Résineux	4 984	4 477	10
Thuya occidental	535	473	12
Toutes essences	14 523	11 634	20

* en mètres carrés

3.7 Impact de la hauteur dominante dans l'estimation des hauteurs individuelles

Nous avons constaté à la section précédente que les coefficients b_1 et b_2 de l'équation (3.4) associés au régresseur HDO correspondant à la hauteur dominante étaient tous significatifs. Nous désirons maintenant illustrer l'importance de cette variable. Pour les fins d'élaboration de graphiques, l'intervalle de DHP s'étend de 1 à 80 cm et la valeur de la hauteur dominante a été fixée successivement à 12, 16, 20 et 24 mètres. On constate aux figures 3.21 à 3.24, l'effet de la hauteur dominante sur la relation « Hauteur-DHP ». Dans le cas du bouleau jaune, la variable « hauteur dominante » apporte un effet considérable. En effet, pour les DHP supérieurs, la hauteur prédite varie de 14 à 24 mètres selon la hauteur dominante. Dans le cas des résineux, la gamme de variation est plus étroite; elle s'étend de 19 à 25 mètres. Pour sa part, le thuya occidental est différent du groupe des autres résineux. Pour une même hauteur dominante, la hauteur prédite est, en effet, de deux à trois mètres plus faible.

3.7.1 Comportement de la hauteur individuelle en fonction du dhp individuel et de la hauteur dominante fixée à 20 mètres

Nous constatons à la figure 3.25 que la hauteur du bouleau jaune, pour les DHP supérieurs à 10 cm, est supérieure à celle du thuya. Par contre pour les gros DHP, on constate le phénomène inverse. Il semble que le bouleau jaune se révèle très peu tolérant à l'ombre et présente une allure plus élancée que le thuya lorsqu'il est en jeune âge. Pour des DHP entre

10 et 30 cm, il réussit même à dépasser le groupe « autres résineux ». L'écrasement de la courbe au niveau des DHP élevés peut s'expliquer par trois phénomènes :

- 1) le bouleau jaune tend à développer une cime plus large que le résineux en vieillissant;
- 2) même lors de la sénescence, le bouleau jaune continue à croître légèrement en diamètre et subit une réduction de la cime du sommet vers le bas. Cette tendance s'accroît en période de dépérissement;
- 3) les résineux, sauf le thuya occidental, tendent à profiter du fait qu'ils sont capables de traverser la voûte foliacée occupée principalement par les feuillus.

Le thuya occidental présente une hauteur plus modeste que les autres résineux pour un même DHP. La forme trapue des tiges est bien connue des forestiers et elle est même une caractéristique de cette essence marginale.

Le tableau 3.10 présente les coefficients utilisés par l'équation 3.4 pour la prédiction de la hauteur individuelle pour différentes espèces. On peut constater que les coefficients du bouleau jaune montrés au tableau 3.8 sont également utilisés pour les autres essences feuillues à effectif marginal. Nous avons agi de la même façon pour les résineux, à l'exception du thuya occidental qui présentait un effectif suffisant pour permettre une régression valable.

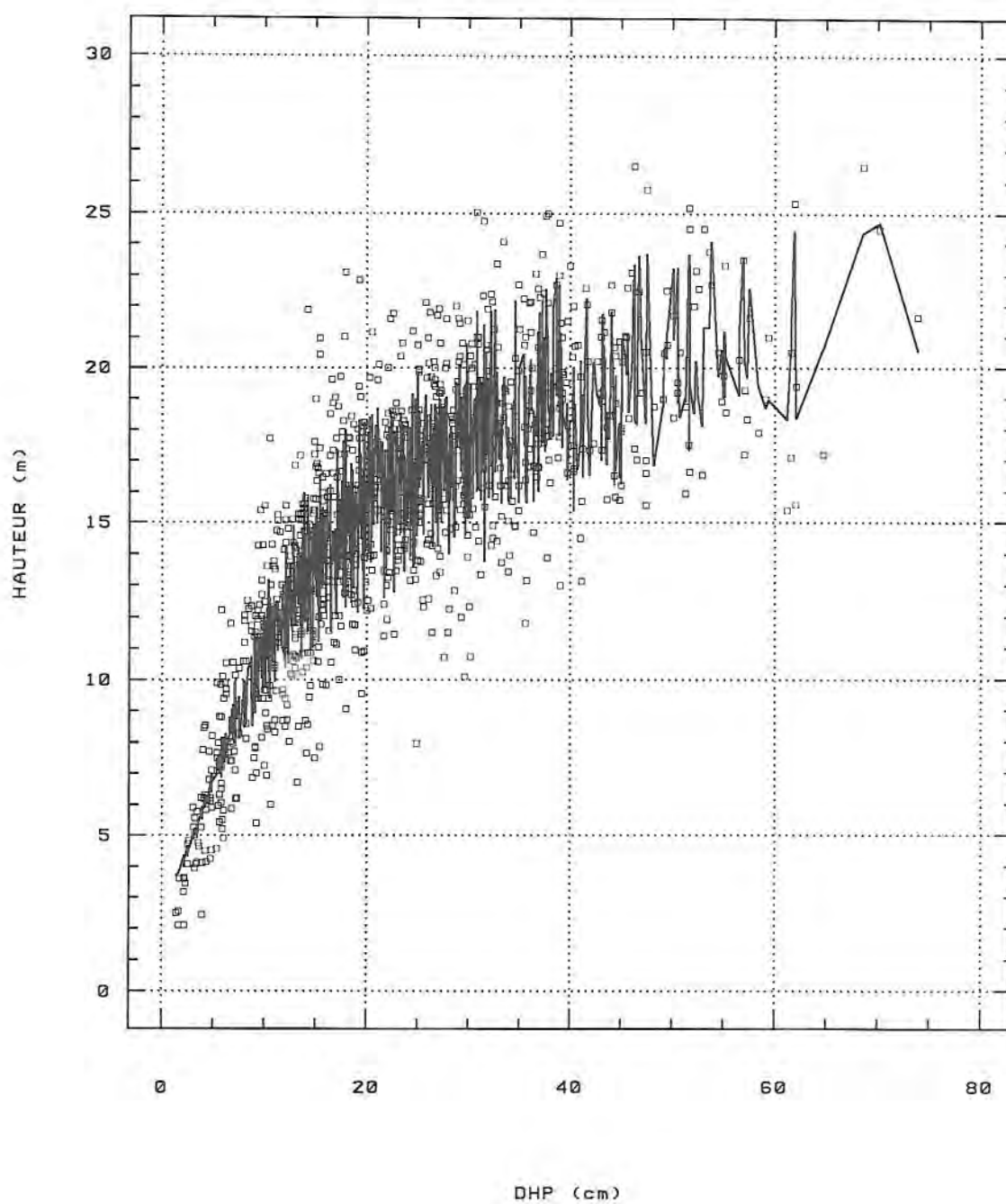


Figure 3.17. Hauteurs individuelles observées et prédites en fonction du DHP et de la hauteur dominante pour les bouleaux jaunes.

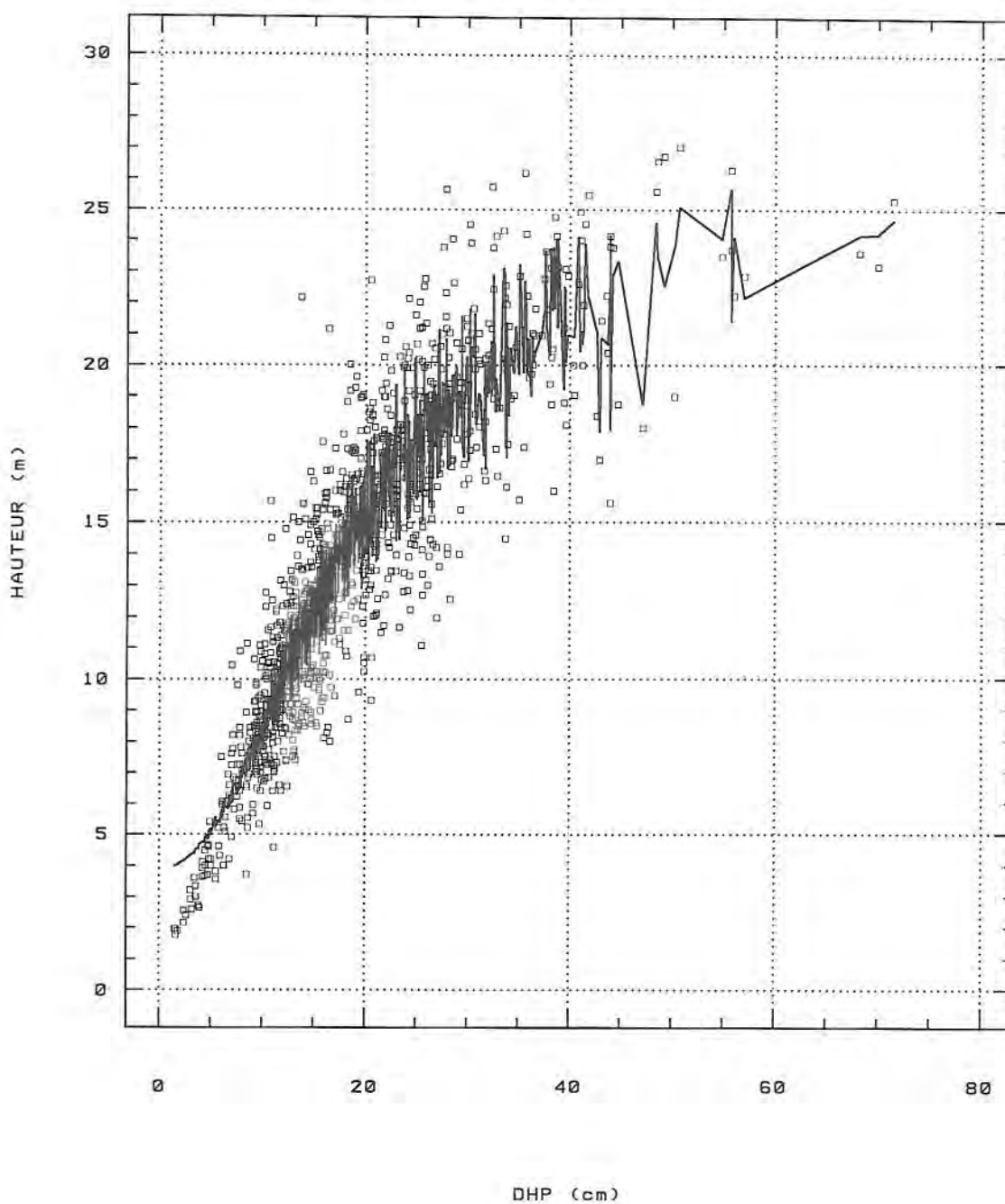


Figure 3.18. Hauteurs individuelles observées et prédites en fonction du DHP et de la hauteur dominante pour les résineux sans les thuyas occidentaux.

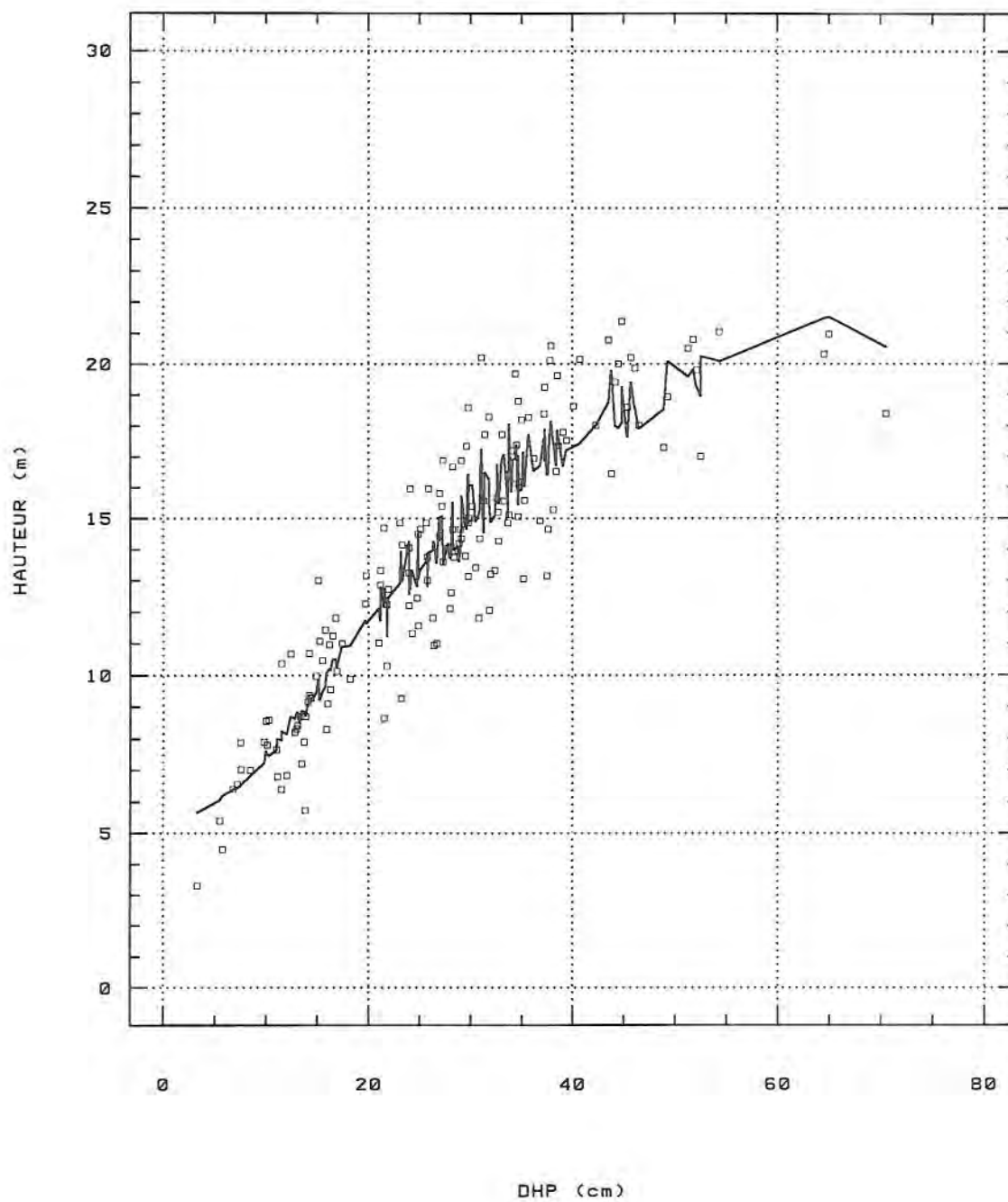


Figure 3.19. Hauteurs individuelles observées et prédites en fonction du DHP et de la hauteur dominante pour les thuyas occidentaux.

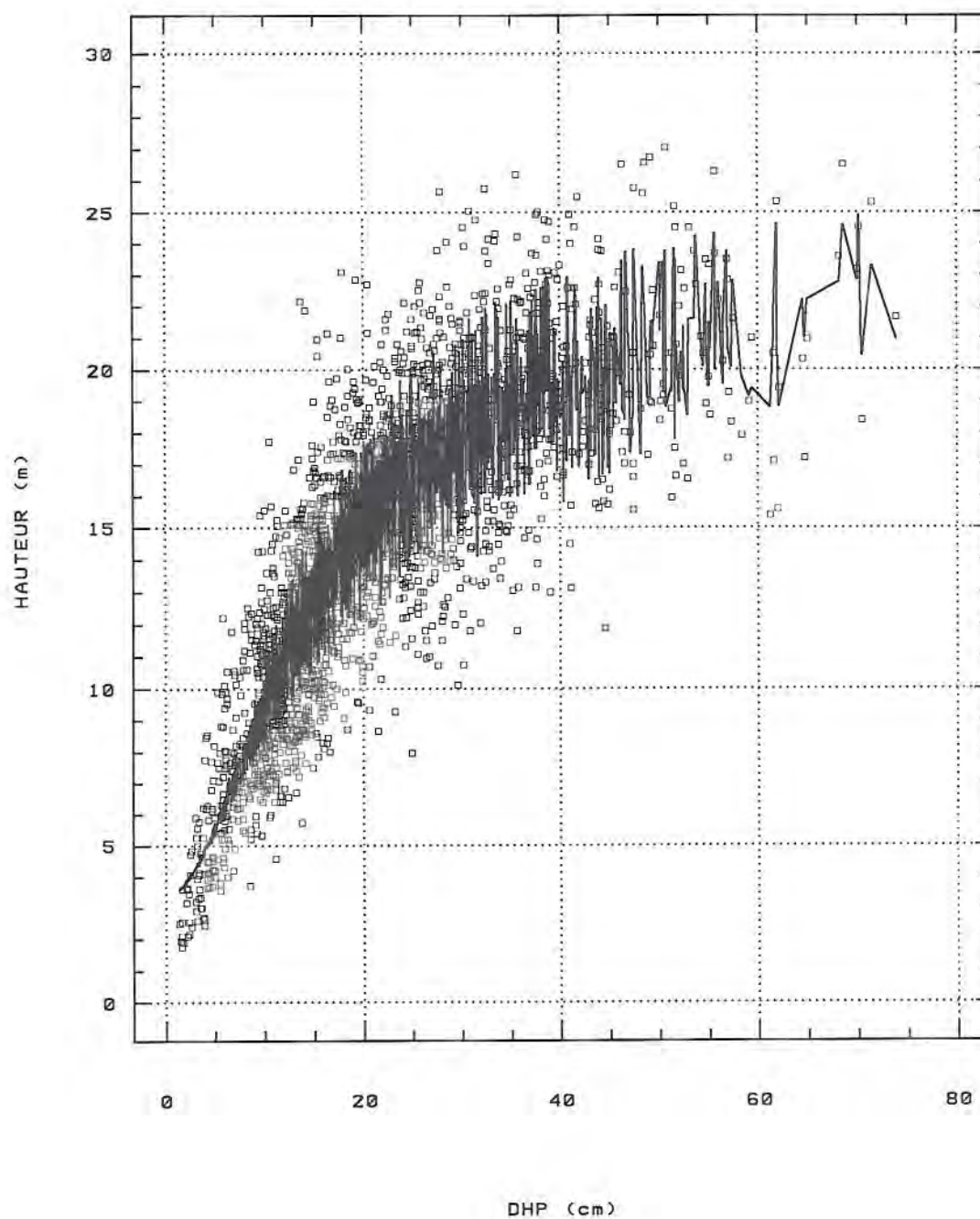


Figure 3.20. Hauteurs individuelles observées et prédites en fonction du DHP et de la hauteur dominante pour toutes les essences confondues.

Tableau 3.8. Coefficients des régressions non linéaires pour l'estimation de la hauteur en fonction du DHP et de la hauteur dominante

Groupe : bouleau jaune

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	1,69935248	0,17471952	9,7262
β_2	0,82933740	0,03539871	23,4285
β_3	0,08886557	0,01875516	4,7382
β_4	1,45184651	0,08315909	17,4587

Groupe : résineux sans thuya occidental

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	2,59878482	0,24719022	10,5133
β_2	0,71037688	0,03307573	21,4773
β_3	0,00741932	0,00224772	3,3008
β_4	2,10972726	0,09830716	21,4606

Groupe : thuya occidental

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	4,09666631	0,73209352	5,5958
β_2	0,55410363	0,07294748	7,5959
β_3	0,00365332	0,00437719	0,8346
β_4	1,97710443	0,36065274	5,4820

Groupe : toutes essences confondues

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	2,02581278	0,15616991	12,9719
β_2	0,77454833	0,02679361	28,9080
β_3	0,03018755	0,00612609	4,9277
β_4	1,72897490	0,07296463	23,6961

Tableau 3.9. Tables d'analyse de la variance des régressions non linéaires pour l'estimation de la hauteur en fonction de DHP et de la hauteur dominante

Groupe : bouleau jaune

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	261297,90	4	65324,47	15171,78
Erreur	4563,9956	1060	4,3057	
Total	265861,89	1064		
Total (Corr.)	21126,467	1063		
$R^2 = 0,7840$				

Groupe : résineux sans thuya occidental

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	214970,27	4	53742,57	12730,90
Erreur	4424,0572	1048	4,2214	
Total	219394,32	1052		
Total (Corr.)	25851,539	1051		
$R^2 = 0,8288$				

Groupe : thuya occidental

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	34935,940	4	8733,985	3239,38
Erreur	442,17569	164	2,69619	
Total	35378,115	168		
Total (Corr.)	2891,7247	167		
$R^2 = 0,8471$				

Groupe : toutes essences confondues

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	508740,98	4	127185,24	24924,38
Erreur	11634,487	2280	5,103	
Total	520375,47	2284		
Total (Corr.)	51235,466	2283		
$R^2 = 0,7729$				

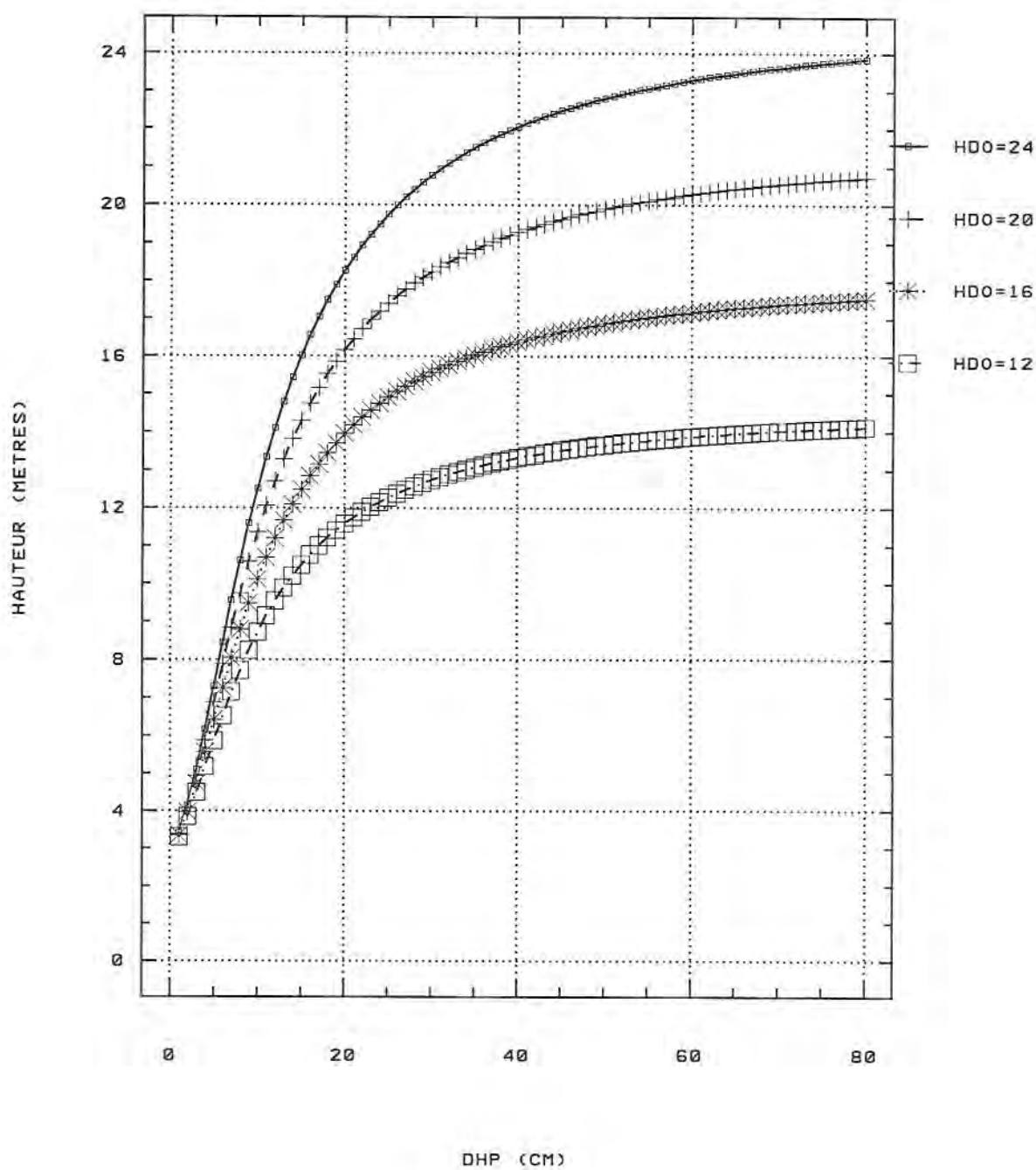


Figure 3.21. Hauteur en fonction du DHP, lorsque la hauteur dominante est fixée à quatre niveaux différents, pour le bouleau jaune

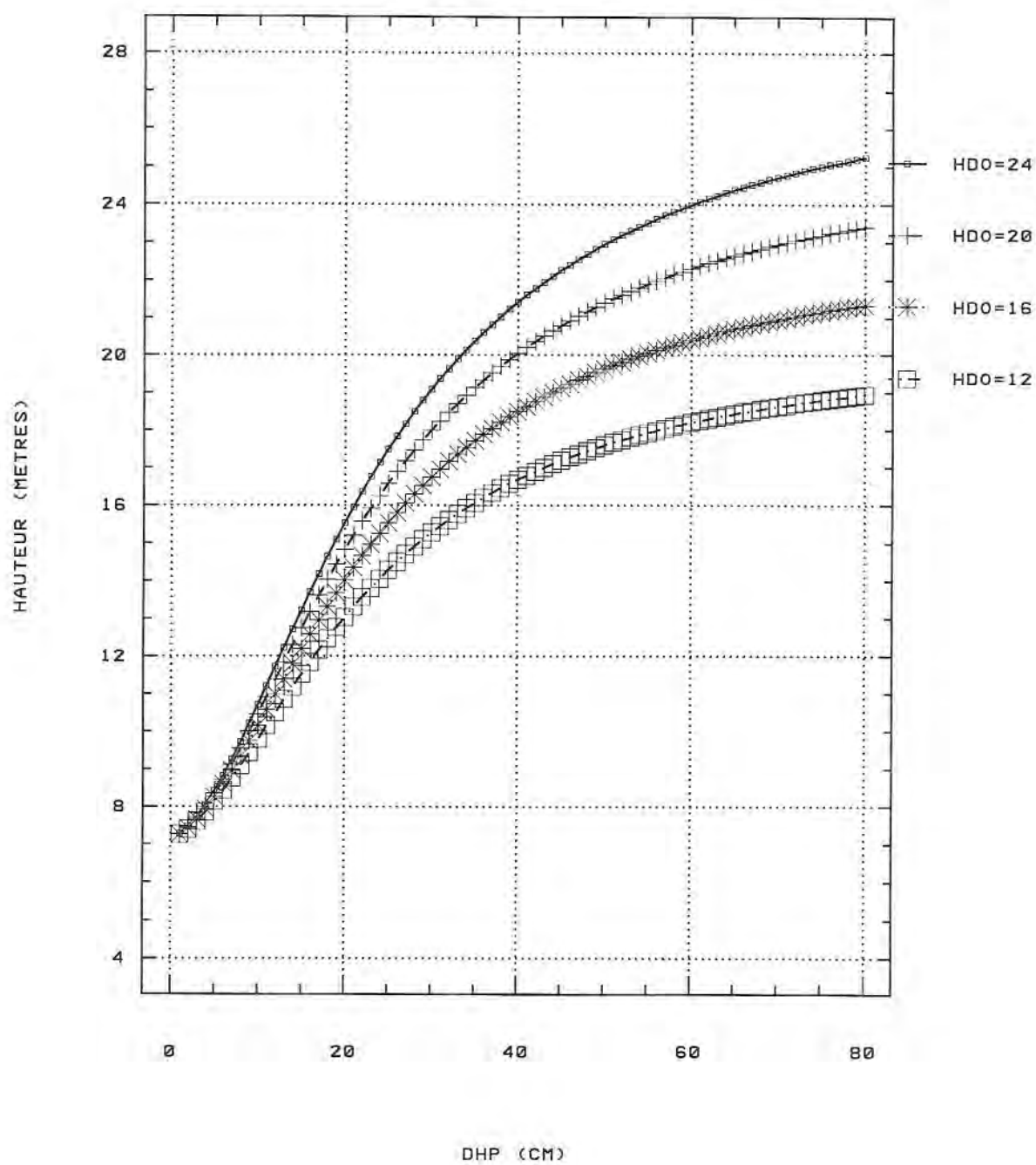


Figure 3.22. Hauteur en fonction du DHP, lorsque la hauteur dominante est fixée à quatre niveaux différents, pour la cohorte résineuse sans le thuya occidental

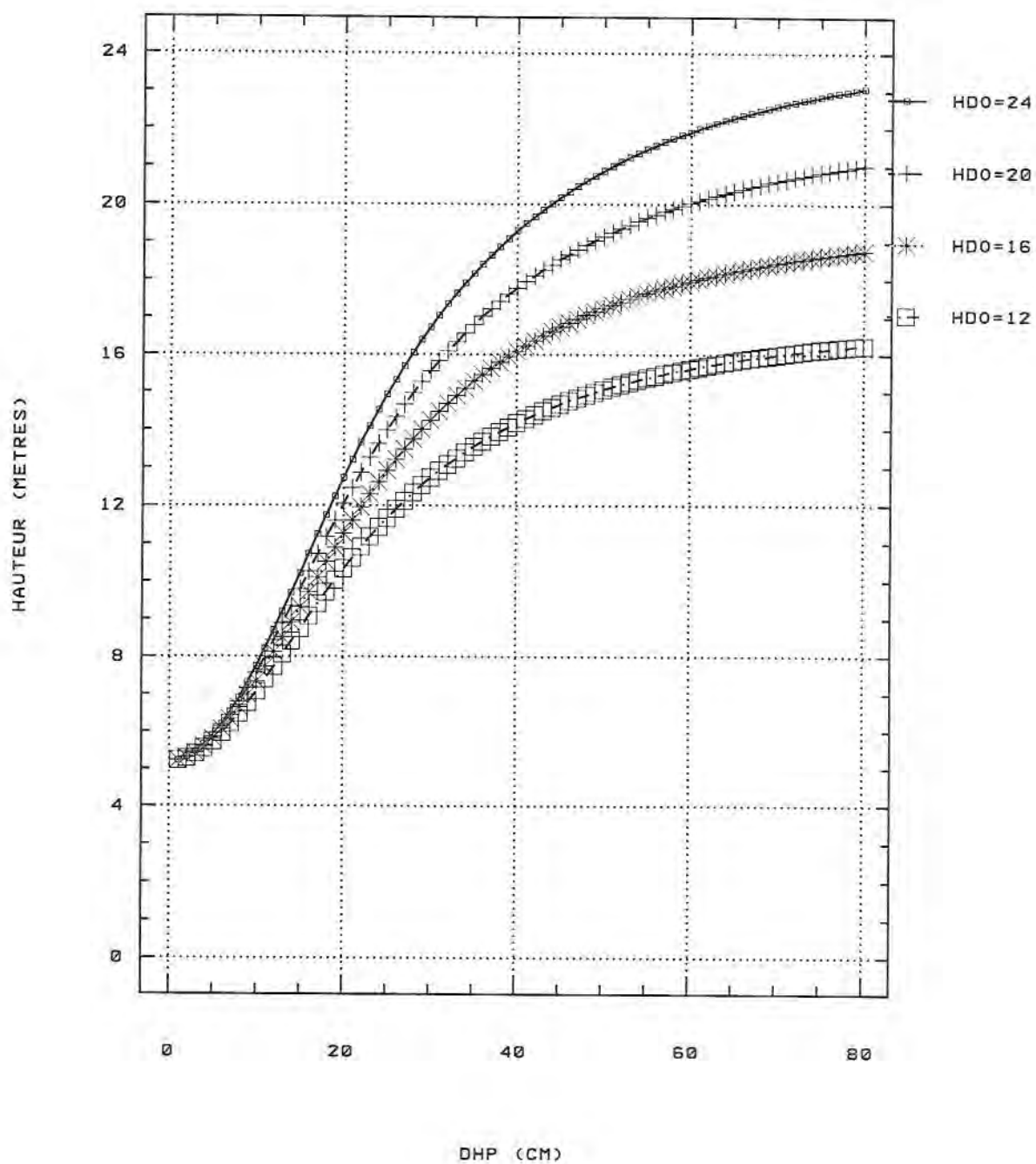


Figure 3.23. Hauteur en fonction du DHP, lorsque la hauteur dominante est fixée à quatre niveaux différents, pour le thuya occidental

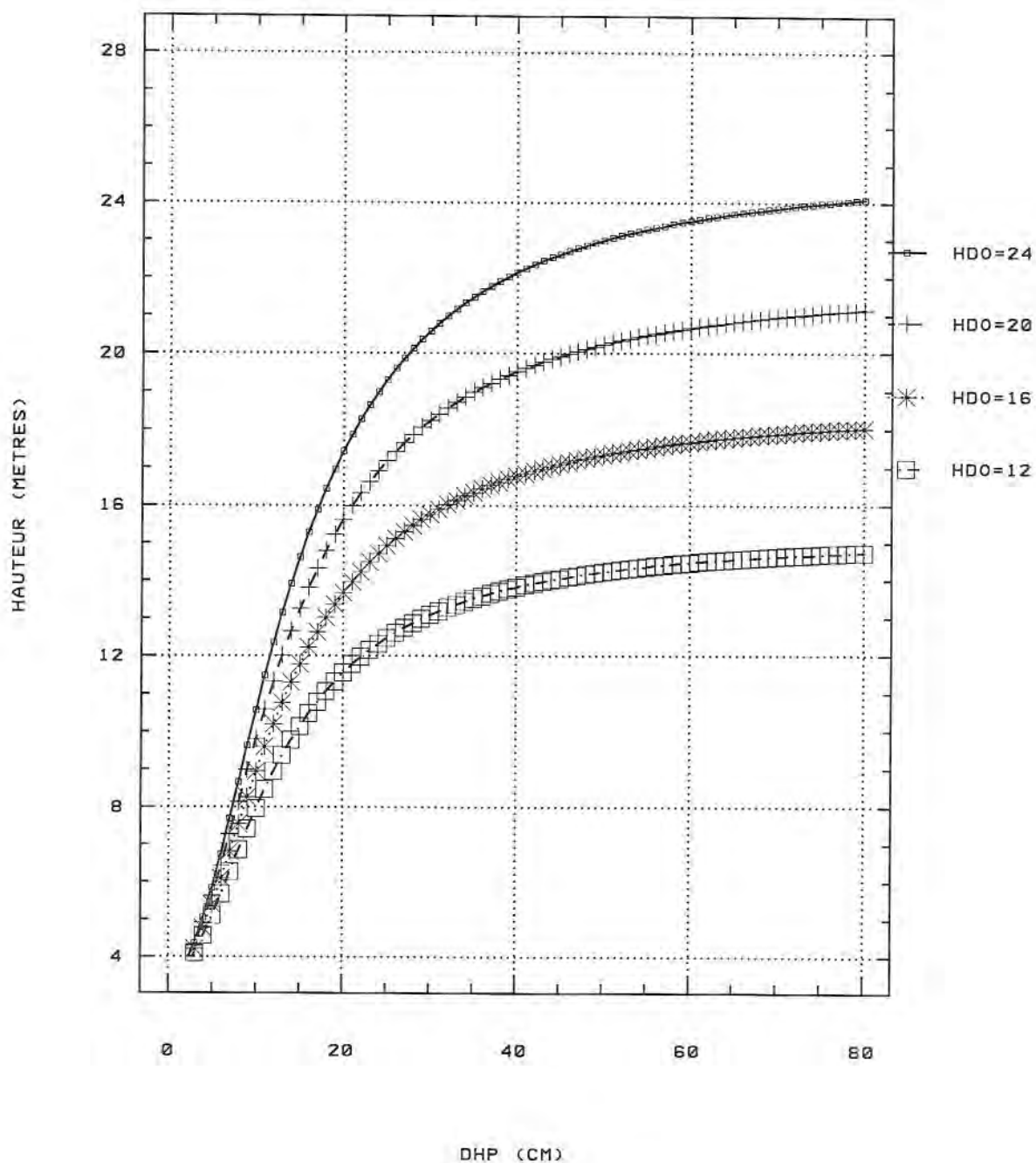


Figure 3.24. Hauteur en fonction du DHP, lorsque la hauteur dominante est fixée à quatre niveaux différents, pour toutes les essences confondues

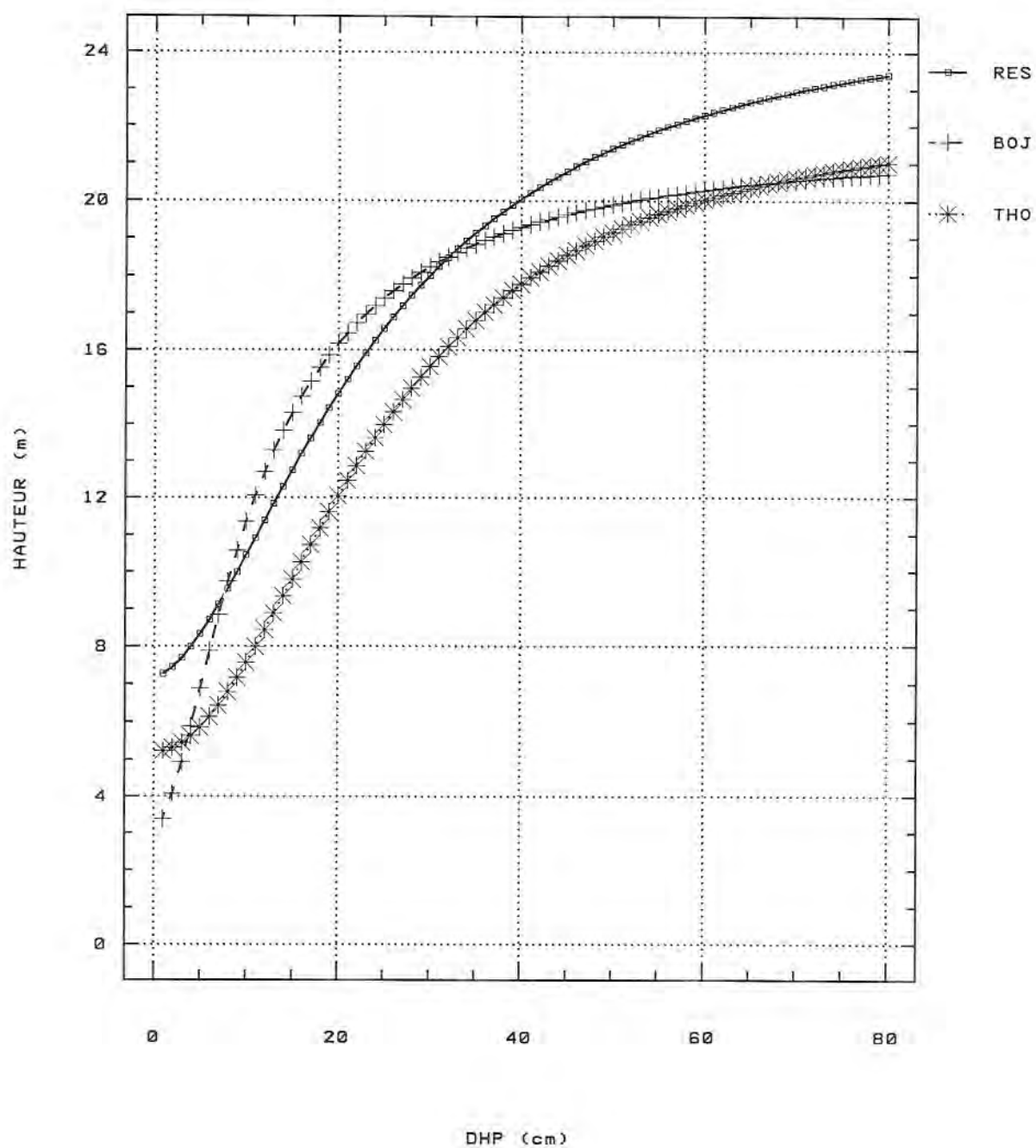


Figure 3.25. Hauteur en fonction du DHP, lorsque la hauteur dominante est fixée à 20 mètres, pour trois cohortes différentes

Tableau 3.10 Matrice PHHDODHPPERRON des coefficients pour le calcul de la hauteur de chaque tige en utilisant la fonction HHDODHP

ESS	B1	B2	B3	B4
BOP	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
BOG	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
BOJ	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
CAC	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
CET	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
CHR	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
EPB	5.88754648	0.47278292	0.00998630	1.65584168
EPN	5.88754648	0.47278292	0.00998630	1.65584168
EPR	5.88754648	0.47278292	0.00998630	1.65584168
ERR	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
ERS	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
FRA	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
FRN	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
HEG	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
MEL	5.88754648	0.47278292	0.00998630	1.65584168
OSV	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
PEG	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
PET	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
PIB	5.88754648	0.47278292	0.00998630	1.65584168
PIG	5.88754648	0.47278292	0.00998630	1.65584168
PIR	5.88754648	0.47278292	0.00998630	1.65584168
PRU	5.88754648	0.47278292	0.00998630	1.65584168
SAB	5.88754648	0.47278292	0.00998630	1.65584168
THO	3.88985976	0.56699678	0.00459140	1.92954150
TIL	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
ORA	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
ERP	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
PRP	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
ERE	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
SAL	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
SOA	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
ORT	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011
AUT	1.70014875	0.82918613	0.08880338	1.45202011

3.8 Prédiction du volume marchand brut individuel

Nous avons élaboré la fonction *VMBPERRON* pour procéder au cubage de chacune des tiges des 101 placettes retenues. La fonction est montrée dans un rapport interne de la DRF (Carpentier 1995). La fonction tient compte de l'identification de l'essence, du DHP individuel observé et de la hauteur individuelle prédite. Elle repose sur les coefficients estimés par Perron (1983) qui sont présentés dans un document intitulé *Tarif de cubage*. Les volumes marchands bruts (VMB) ont été obtenus par analyses de tiges sommaires et ils ont été exprimés en fonction des caractéristiques individuelles de chaque tige. Le modèle d'équation généralisé que nous avons déduit des travaux de Perron (1983) est le suivant :

$$VMB = \beta_1 + \beta_2 DHP + \beta_3 DHP^2 + \beta_4 H + \beta_5 H^2 + \beta_6 H DHP + \beta_7 H DHP^2 + \varepsilon \quad (3.5)$$

Les coefficients β_i , $i = 1 \dots 7$, de l'équation ont été réunis dans la matrice *COEFPERRON33* et ils sont montrés au tableau 3.11. Nous avons affecté des coefficients nuls dans les cas où Perron n'avait pas retenu une ou plusieurs des six variables possibles. La fonction se trouve ainsi généralisée : elle peut servir quelle que soit l'essence. Dans le cas des huit dernières essences qui ne présentent aucune valeur économique, nous leur avons affecté les coefficients du bouleau jaune en vue d'obtenir des estimés de volume non nuls. Les sommations de VMB par placette sont ainsi plus plausibles.

Les volumes individuels ont été prédits en tenant compte de la hauteur dominante de la placette à une mesure donnée, des caractéristiques individuelles de chaque tige et des coefficients estimés par essence. Les résultats, pour les deux premières placettes et pour la première mesure, sont montrés au tableau 3.12. Les autres résultats ne sont pas publiés car ils comprennent plus de 6 000 lignes. Les données sont cependant reproductibles en tout temps et disponibles pour fin de vérification.

Les volumes individuels produits ont été additionnés par placette pour toutes les essences confondues et ils sont montrés seulement pour les 50 premières placettes et pour la mesure 1 dans le tableau 3.13. Les autres résultats sont également reproductibles.

3.9 Prédiction du volume marchand brut de la placette à partir de la surface terrière marchande et la hauteur dominante

Il a déjà été expliqué à la section 3.8 comment est estimé le volume marchand brut individuel. Par sommation de ces volumes, toutes essences confondues, on obtient une estimation du volume de matière ligneuse de chacune des placettes. Grâce à une régression non linéaire, ces volumes marchands bruts (placette) sont exprimés en fonction de deux variables indépendantes connues au niveau « placette » : la hauteur dominante (HDO) et la surface terrière marchande (STM). Dans le cas des placettes où le sondage ne permet pas le calcul de la hauteur dominante (HDO), cette dernière est estimée à partir des données disponibles grâce au modèle 3.4 décrit dans la section 3.5. Ces deux variables (HDO et STM) expliquent à elles seules 98 % de la variation observée dans les volumes estimés dans les 101 placettes sélectionnées.

$$VMB = f(HDO, STM) + \varepsilon$$

$$VMB = \beta_1 + \beta_2 HDO^{\beta_3} STM^{\beta_4} + \varepsilon \quad (3.6)$$

où

VMB : volume marchand brut, en mètres cubes par placette, toutes essences confondues;

STM : surface terrière marchande, en mètres carrés par placette, toutes essences confondues;

HDO : hauteur dominante en mètres, toutes essences confondues, pour une placette.

Au tableau 3.14, les quatre coefficients, estimés par la méthode des moindres carrés de manière itérative, s'avèrent tous statistiquement significatifs. Le pouvoir explicatif de l'équation est confirmé par les valeurs montrées au tableau 3.15. Ces dernières démontrent que les régresseurs choisis expliquent 98 % de la variation observée.

L'équation 3.6 a servi à compléter le tableau 3.16. Ce dernier présente un abaque qui permet d'obtenir une estimation rapide du volume marchand brut en mètres cubes par hectare lorsque la hauteur dominante exprimée en mètres et la surface terrière marchande en mètres carrés par hectare sont connues.

Tableau 3.11 Matrice COEFPERRON33 des coefficients pour le calcul du volume marchand brut de chaque tige en utilisant la fonction VMBPERRON

ESS	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
BOP	1.40116	0.00000	0.00000	-2.79523	0.00000	0.12760	0.03278
BOG	3.34500	0.00000	0.00000	-4.81400	0.00000	0.41500	0.02000
BOJ	0.00000	1.40116	-0.05096	-1.60895	0.00000	-0.10979	0.03819
CAC	0.78290	0.00000	0.00000	0.13219	0.00000	-0.27118	0.03959
CET	0.00000	0.00000	0.00000	-1.82244	0.00000	0.00000	0.03442
CHR	-7.62980	0.00000	0.00000	3.08805	0.00000	-0.09110	0.03516
EPB	-24.98890	4.90312	-0.21366	-4.69120	0.00000	0.33143	0.03131
EPN	-16.84260	3.08805	0.00000	-4.39883	0.24540	0.00000	0.02617
EPR	1.51340	0.00000	0.00000	-4.38019	0.00000	0.36715	0.02595
ERR	0.00000	0.00000	0.00000	-1.17249	0.00000	-0.03843	0.03287
ERS	7.50920	0.00000	0.00000	-2.37931	0.00000	0.00000	0.03361
FRA	6.97730	-2.34243	0.21663	0.00000	0.00000	-0.14065	0.02777
FRN	0.47840	-0.52712	0.10110	0.00000	0.00000	-0.27414	0.03885
HEG	0.00000	0.00000	0.00000	-2.57051	0.00000	0.09860	0.03382
MEL	-9.76920	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.03217
OSV	0.00000	0.00000	0.09197	-4.71638	0.00000	0.40091	0.01579
PEG	0.00000	0.00000	0.00000	-1.26282	0.00000	0.00000	0.03180
PET	0.00000	0.00000	0.00000	-1.58816	0.00000	0.00000	0.03585
PIB	0.00000	0.00000	0.00000	-5.16886	0.00000	0.48993	0.02382
PIG	-41.46260	8.33767	-0.31452	-4.31208	0.12883	0.00000	0.03936
PIR	0.00000	0.00000	-0.04629	-2.11988	0.00000	0.19273	0.03051
PRU	0.00000	0.00000	0.00000	-3.04485	0.00000	0.21310	0.02723
SAB	12.53790	0.00000	-0.07977	-7.75924	0.00000	0.73319	0.01852
THO	0.00000	0.00000	0.03224	-4.14505	0.00000	0.39731	0.01995
TIL	0.00000	0.00000	0.00000	-2.12798	0.00000	0.00000	0.03399
ORA	0.00000	1.40116	-0.05096	-1.60895	0.00000	-0.10979	0.03819
ERP	0.00000	1.40116	-0.05096	-1.60895	0.00000	-0.10979	0.03819
PRP	0.00000	1.40116	-0.05096	-1.60895	0.00000	-0.10979	0.03819
ERE	0.00000	1.40116	-0.05096	-1.60895	0.00000	-0.10979	0.03819
SAL	0.00000	1.40116	-0.05096	-1.60895	0.00000	-0.10979	0.03819
SOA	0.00000	1.40116	-0.05096	-1.60895	0.00000	-0.10979	0.03819
ORT	0.00000	1.40116	-0.05096	-1.60895	0.00000	-0.10979	0.03819
AUT	0.00000	1.40116	-0.05096	-1.60895	0.00000	-0.10979	0.03819

Les valeurs apparaissant à l'abaque présenté au tableau 3.16 représentent une intégration des observations et des calculs de hauteur individuelle, de même que des calculs de volume marchand brut, suivant les caractéristiques de chacune des essences. Les volumes marchands bruts, au niveau placette, sont prédits par l'équation 3.6. Cette dernière utilise comme argument la surface terrière marchande et la hauteur dominante toutes essences confondues.

Un graphique en trois dimensions est montré en figure 3.26. Il illustre l'allure des observations à l'état initial pour les 101 placettes retenues. Le volume de la placette suit directement l'augmentation de la surface terrière marchande de la placette. On remarque également une augmentation du volume marchand brut de la placette lorsque la hauteur dominante augmente, quoique la tendance soit moins forte. En effet, il y a des placettes dont la hauteur dominante est 14, 15, 16 ou même 17 mètres qui présentent des volumes plutôt faibles. Des niveaux faibles de densité expliquent sans doute ce phénomène.

Tableau 3.12 Statistiques relatives à la détermination du volume marchand brut individuel pour toutes les essences à la mesure 1

NO	PLACETTE	DHP (cm)	HAUTEUR DOM. (m)	HAUTEUR (m)	VOLUME (m³)	ESSENCE
1	452171081	13.0	14.83	11.16	0.043	ERR
2	452171081	17.3	14.83	12.85	0.123	SAB
3	452171081	22.1	14.83	13.69	0.206	BOJ
4	452171081	14.8	14.83	11.84	0.065	ERR
5	452171081	9.1	14.83	9.19	0.011	ERR
6	452171081	23.4	14.83	14.76	0.257	SAB
7	452171081	20.3	14.83	13.34	0.166	BOJ
8	452171081	11.2	14.83	10.35	0.029	BOJ
9	452171081	32.3	14.83	14.97	0.511	BOJ
10	452171081	10.2	14.83	9.83	0.021	BOJ
11	452171081	22.9	14.83	11.95	0.201	THO
12	452171081	23.1	14.83	14.68	0.250	SAB
13	452171081	23.4	14.83	13.91	0.238	BOJ
14	452171081	13.7	14.83	11.44	0.056	BOJ
15	452171081	25.9	14.83	14.28	0.304	BOJ
16	452171081	16.9	14.83	12.51	0.095	ERR
17	452171081	29.7	14.83	14.73	0.421	BOJ
18	452171081	9.7	14.83	9.94	0.016	SAB
19	452171081	31.8	14.83	14.93	0.493	BOJ
20	452171081	20.3	14.83	13.85	0.184	SAB
21	454274442	10.7	13.35	9.55	0.024	BOJ
22	454274442	10.5	13.35	9.46	0.023	BOJ
23	454274442	29.3	13.35	15.67	0.435	EPB
24	454274442	12.5	13.35	10.32	0.040	BOJ
25	454274442	9.1	13.35	8.74	0.013	BOJ
26	454274442	13.3	13.35	11.15	0.057	SAB
27	454274442	11.0	13.35	9.69	0.026	BOP
28	454274442	14.0	13.35	10.86	0.057	BOJ
29	454274442	9.9	13.35	9.16	0.018	BOJ
30	454274442	12.0	13.35	10.12	0.036	BOJ
31	454274442	11.7	13.35	10.00	0.033	BOJ
32	454274442	12.7	13.35	10.93	0.049	SAB
33	454274442	13.5	13.35	11.23	0.064	EPB
34	454274442	29.2	13.35	15.65	0.432	EPB
35	454274442	14.5	13.35	11.58	0.080	PIB
36	454274442	10.2	13.35	9.31	0.016	CET
37	454274442	31.9	13.35	16.15	0.523	EPB
38	454274442	10.2	13.35	9.31	0.016	CET
39	454274442	10.0	13.35	9.21	0.019	BOJ
40	454274442	11.4	13.35	9.87	0.030	BOJ
41	454274442	13.7	13.35	10.76	0.056	BOP
42	454274442	20.3	13.35	12.46	0.167	BOP
43	454274442	13.9	13.35	10.83	0.059	BOP
44	454274442	11.1	13.35	9.73	0.028	BOJ
45	454274442	9.0	13.35	9.55	0.010	EPB
46	454274442	12.1	13.35	10.16	0.036	BOJ
47	454274442	9.6	13.35	9.01	0.016	BOJ
48	454376162	30.5	18.98	17.82	0.513	PRU
49	454376162	28.5	18.98	17.36	0.455	BOJ
50	454376162	28.5	18.98	17.32	0.435	PRU

Tableau 3.13 Statistiques relatives à la détermination du volume marchand brut par placette, pour toutes les essences à la mesure 1

NO	PLACETTE	VOLUME (m ³)	HAUTEUR DOM. (m)	SURFACE TERRIERE (m ²)
1	452171081	3.692	14.825	0.679
2	454274442	2.365	13.350	0.494
3	454376162	8.452	18.975	1.211
4	454574142	7.908	17.700	1.327
5	460274581	7.461	17.225	1.266
6	460274582	9.641	16.600	1.470
7	460874452	9.522	20.575	1.272
8	461274301	1.628	15.250	0.315
9	461373462	3.861	12.975	0.750
10	461476081	3.173	13.600	0.566
11	461476082	2.959	10.825	0.719
12	461574151	5.944	17.467	0.959
13	461675431	15.976	22.033	1.841
14	461874442	3.499	16.460	0.598
15	462278332	6.474	18.450	0.949
16	462377512	5.817	14.300	1.166
17	462577192	6.804	14.250	1.281
18	462674411	4.585	16.525	0.796
19	462675161	3.544	16.200	0.599
20	463378091	9.750	13.960	1.757
21	463378092	13.157	18.800	1.798
22	463577592	4.093	15.930	0.708
23	463674551	7.496	17.620	1.188
24	463878061	7.237	16.000	1.179
25	463973282	3.763	12.950	0.841
26	464074572	6.432	15.233	1.239
27	464178171	1.661	14.325	0.287
28	464178392	4.461	16.567	0.821
29	464278191	4.566	16.300	0.747
30	464278481	18.091	24.200	1.960
31	464478361	3.325	14.233	0.763
32	464573051	6.874	15.433	1.172
33	464574501	4.044	14.525	0.807
34	464775082	6.138	16.533	0.976
35	464873122	6.602	17.900	1.057
36	464972142	12.445	23.968	1.378
37	464978421	5.238	15.467	0.849
38	464978422	5.671	16.967	0.910
39	465072382	3.300	19.350	0.476
40	465174421	5.529	16.967	0.896
41	465274132	6.652	14.033	1.064
42	465371431	6.826	20.640	0.971
43	465474421	10.850	18.550	1.547
44	465674401	6.163	19.950	0.875
45	465872011	2.954	15.433	0.508
46	465873162	4.335	13.880	0.825
47	465974191	5.007	13.300	0.861
48	465974342	6.109	15.500	1.081
49	465976422	3.524	13.976	0.689
50	470073072	5.503	16.650	0.896
101	PLACETTES	548.206	15.802	90.677

Tableau 3.14. Coefficients de la régression non linéaire pour l'estimation du volume marchand brut en fonction de la hauteur dominante et de la surface terrière marchande**Groupe : toutes essences confondues**

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	<i>t</i>
B ₁	0,51823077	0,17471891	2,9661
B ₂	0,50460067	0,06607814	7,6364
B ₃	0,86051355	0,04076673	21,1082
B ₄	1,20640446	0,04390446	27,4779

Tableau 3.15. Table d'analyse de la variance pour la régression non linéaire du volume marchand brut en fonction de la hauteur dominante et de la surface terrière marchande**Groupe : toutes essences confondues**

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	<i>F</i>
Modèle	3911,2525	4	977,8131	8322,9780
Erreur	11,395906	97	0,117484	
Total	3922,6484	101		
Total (Corr.)	845,16089	100		
$R^2 = 0,9865$				

Aux figures 3.27 et 3.28, nous montrons l'effet d'une variable explicative lorsque la deuxième est fixée à différents niveaux susceptibles d'être observés. Lors de l'évolution normale de la croissance des arbres d'une placette, les variables explicatives sont corrélées positivement et ne sont jamais véritablement indépendantes.

3.9.1 Estimation du rapport « VMB/STM »

Sans leurs travaux de terrain, les forestiers doivent parfois estimer sommairement le volume marchand brut (VMB) dans un peuplement. À l'aide du prisme ou d'une jauge d'angle, ils obtiennent efficacement une estimation de la surface terrière marchande. En multipliant cette dernière valeur par le rapport (VMB/STM), ils obtiennent une approximation assez précise du volume marchand brut réel. Le tableau 3.17 montre les rapports correspondant à une gamme de hauteurs dominantes. Ces rapports sont estimés par l'équation suivante :

$$\text{VMB/STM} = 0,776535 + 0,326736 \text{ HDO} \quad (3.7).$$

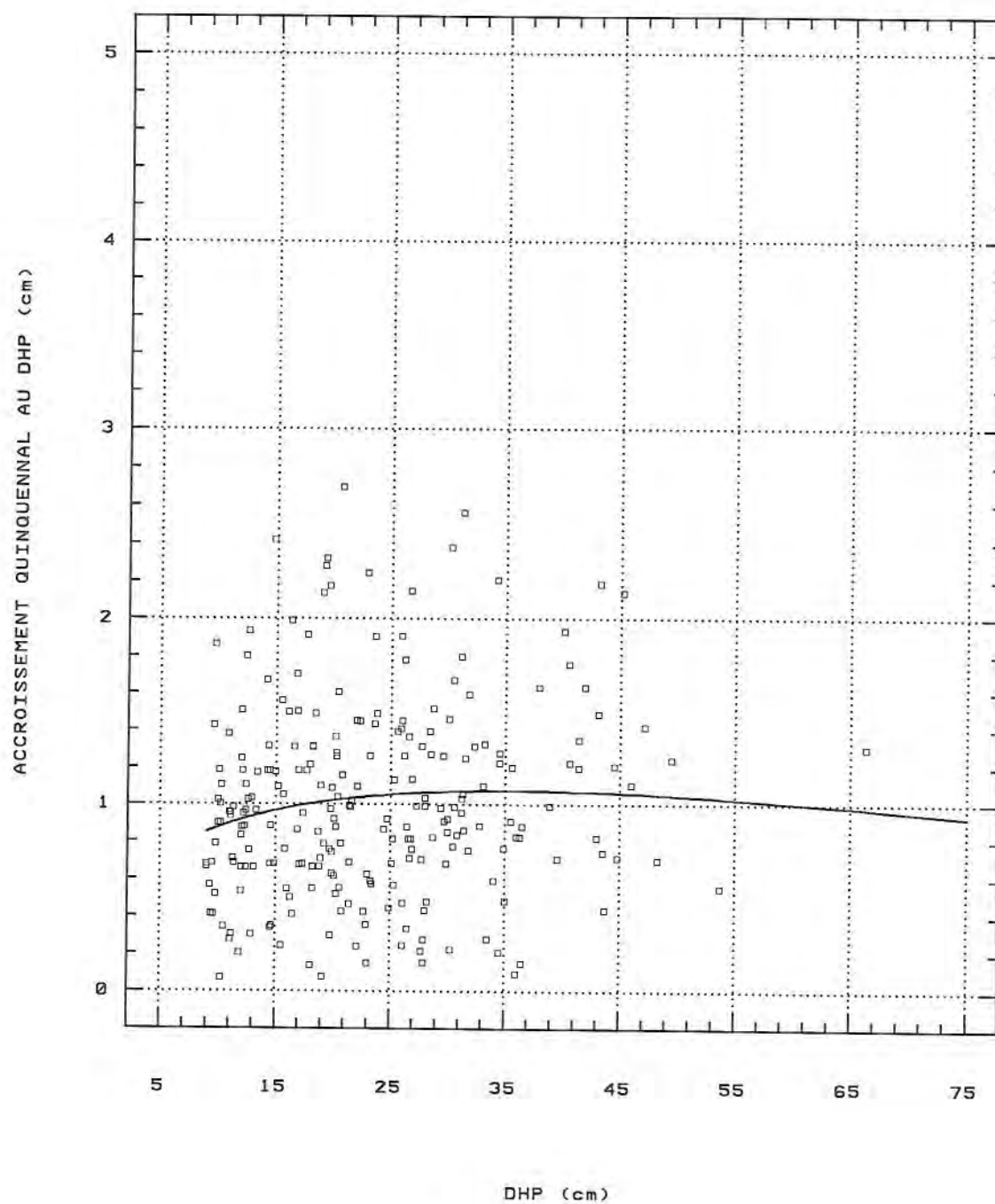


Figure 6.11. Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges de *Thuja occidentalis*.

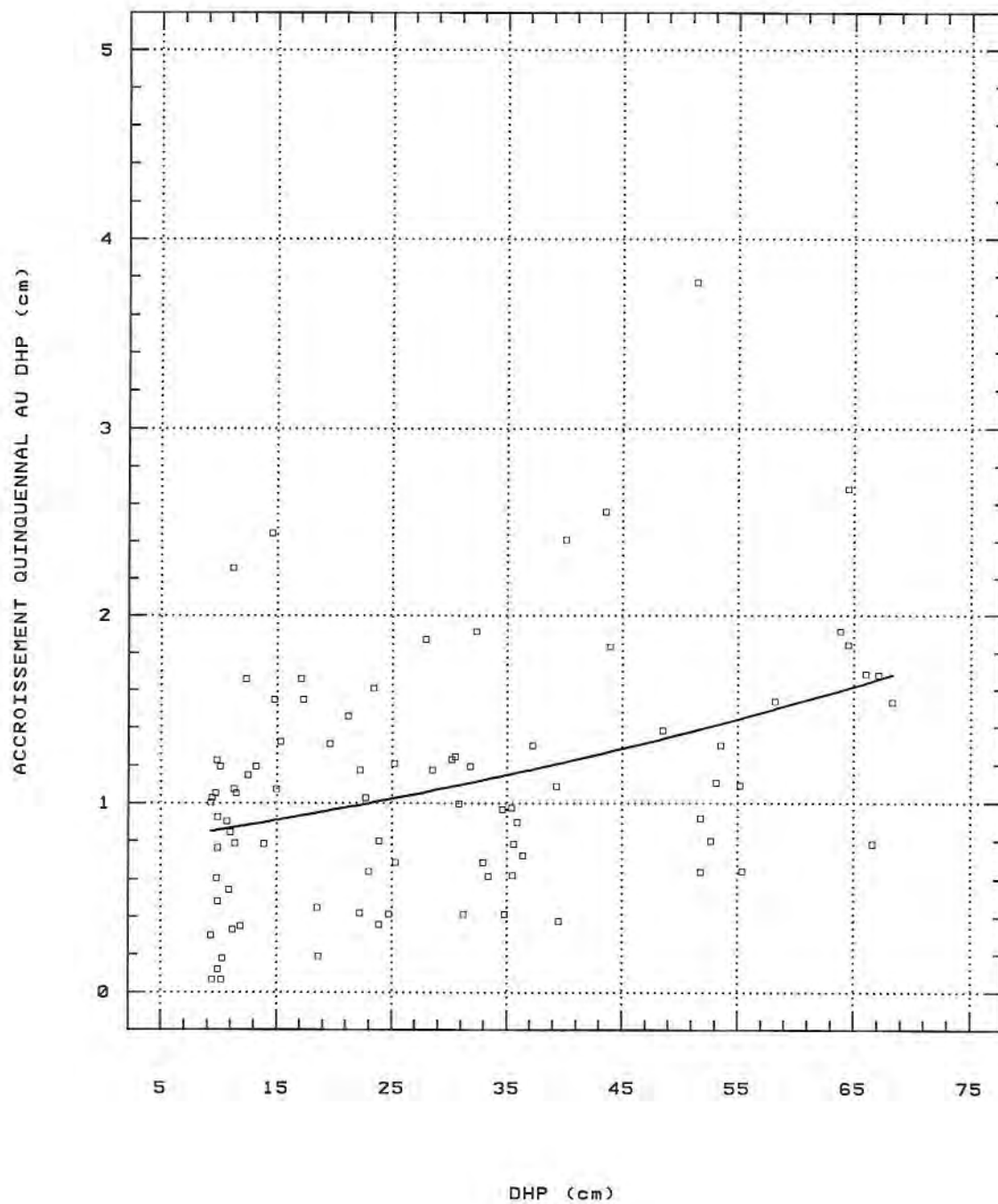


Figure 6.12. Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges de pruche du Canada.

Tableau 6.7 Sommation en cm des accroissements diamétraux observés et prédits par essence en utilisant la fonction de régression non linéaire CAC

ESS	ACCROISSEMENT		ACCROISSEMENT		ACCROISSEMENT		ACCROISSEMENT	
	PÉRIODE 1-2		PÉRIODE 2-3		PÉRIODE 3-4		PÉRIODE 1-4	
	OBSERVÉ	PRÉDIT	OBSERVÉ	PRÉDIT	OBSERVÉ	PRÉDIT	OBSERVÉ	PRÉDIT
BOJ	161.27	158.06	54.12	57.36	4.37	4.33	219.75	219.75
BOP	38.76	38.83	10.56	10.48	0.00	0.00	49.31	49.31
ERS	20.81	20.13	8.61	9.29	0.00	0.00	29.42	29.42
ERR	27.90	29.57	16.61	15.18	4.34	4.10	48.84	48.84
PRP	5.32	6.21	3.96	3.08	0.00	0.00	9.28	9.29
SAB	168.00	168.40	43.05	42.42	5.13	5.36	216.18	216.18
EPB	25.77	27.58	7.98	6.13	0.00	0.00	33.75	33.71
EPR	10.99	10.56	3.35	3.78	0.00	0.00	14.34	14.34
THO	41.20	41.38	6.95	6.87	0.30	0.21	48.46	48.46
PRU	11.57	12.73	7.42	6.25	0.00	0.00	18.99	18.98
TOT	511.59	513.44	162.60	160.84	14.13	14.00	688.33	688.28

Étant donné les résultats globaux montrés aux colonnes 8 et 9 du tableau 6.7, on admet que les étapes de la régression et de la programmation se sont bien déroulées. Les résultats des périodes 1-2, 2-3 et 3-4 sont cependant plus variables. Pour une essence donnée, les biais dans les prédictions se compensent d'une période à l'autre. Ceci indique que les conditions de croissance étaient légèrement plus favorables pour certaines essences (BOJ, ERS, EPB et EPR) en période 1-2 que pour l'ensemble de la période 1-4. À l'inverse, ces même essences ont légèrement sous performé en période 2-3. Ceci démontre qu'un utilisateur doit adapter le modèle aux conditions locales ou temporelles s'il les croit différentes de celles qui ont orienté la croissance dans les placettes-échantillons permanentes entre 1971 et 1990.

En résumé, la fonction *CAC*, dont la seule variable explicative est le DHP, opère sans biais globalement mais son niveau de performance par placette et par essence peut être mis en doute. Les valeurs de la statistique R^2 montrées aux tableaux 6.4 et 6.6 doivent inciter à la prudence. Nous avons cherché un modèle plus explicatif. Nous verrons comment y apporter des améliorations à la section 6.5.

6.3.5 Comparaison de l'accroissement diamétral pour les deux essences principales

La fonction *APL*, *FAITMACCRDHP*, réunit les coefficients de l'équation 6.3 dans une matrice et produit un tableau d'accroissements prédits par essence pour les classes de DHP de 10 à 74 cm avec deux centimètres comme amplitude de classe. Cette

Tableau 6.8 Accroissements quinquennaux en diamètre (cm) calculés par la fonction CAC par essence et par classe de DHP

DHP	BOJ	BOP	ERS	ERR	PRP	SAB	EPB	EPR	THO	PRU
10	1.129	1.185	1.216	1.221	1.372	0.756	0.663	0.616	0.876	0.860
12	1.210	1.253	1.265	1.326	1.566	0.916	0.864	0.732	0.918	0.881
14	1.269	1.291	1.303	1.396	1.602	1.057	1.053	0.839	0.952	0.902
16	1.312	1.303	1.333	1.438	1.512	1.179	1.223	0.938	0.980	0.923
18	1.341	1.296	1.356	1.456	1.343	1.279	1.369	1.028	1.003	0.945
20	1.359	1.273	1.373	1.454	1.136	1.360	1.488	1.109	1.021	0.967
22	1.367	1.239	1.385	1.437	0.924	1.420	1.580	1.181	1.036	0.990
24	1.366	1.197	1.394	1.407	0.728	1.463	1.645	1.245	1.048	1.013
26	1.359	1.148	1.399	1.368	0.558	1.490	1.685	1.301	1.057	1.036
28	1.346	1.095	1.401	1.321	0.418	1.501	1.702	1.349	1.064	1.061
30	1.329	1.039	1.400	1.269	0.307	1.500	1.699	1.390	1.069	1.085
32	1.307	0.982	1.398	1.212	0.222	1.487	1.678	1.425	1.072	1.110
34	1.282	0.925	1.393	1.154	0.158	1.465	1.642	1.453	1.073	1.136
36	1.254	0.868	1.387	1.094	0.111	1.435	1.594	1.475	1.073	1.163
38	1.225	0.812	1.380	1.034	0.077	1.397	1.536	1.492	1.072	1.189
40	1.193	0.758	1.371	0.974	0.052	1.355	1.471	1.503	1.070	1.217
42	1.160	0.705	1.361	0.915	0.036	1.308	1.400	1.511	1.067	1.245
44	1.127	0.655	1.349	0.857	0.024	1.258	1.326	1.513	1.062	1.274
46	1.092	0.608	1.338	0.802	0.016	1.205	1.249	1.512	1.057	1.303
48	1.058	0.562	1.325	0.748	0.011	1.151	1.172	1.508	1.052	1.334
50	1.023	0.519	1.311	0.697	0.007	1.097	1.095	1.500	1.045	1.364
52	0.988	0.479	1.297	0.648	0.005	1.042	1.019	1.489	1.038	1.396
54	0.953	0.441	1.283	0.602	0.003	0.987	0.945	1.475	1.031	1.428
56	0.919	0.406	1.268	0.558	0.002	0.933	0.874	1.459	1.023	1.461
58	0.885	0.373	1.252	0.516	0.001	0.880	0.806	1.441	1.014	1.495
60	0.851	0.343	1.237	0.477	0.001	0.828	0.740	1.421	1.005	1.529
62	0.818	0.314	1.221	0.441	0.001	0.778	0.679	1.399	0.996	1.564
64	0.786	0.288	1.205	0.406	0.000	0.730	0.621	1.376	0.987	1.601
66	0.755	0.263	1.188	0.374	0.000	0.683	0.567	1.352	0.977	1.637
68	0.724	0.241	1.172	0.345	0.000	0.639	0.516	1.326	0.967	1.675
70	0.694	0.220	1.155	0.317	0.000	0.596	0.469	1.300	0.957	1.714
72	0.665	0.201	1.138	0.291	0.000	0.556	0.425	1.272	0.947	1.753
74	0.637	0.183	1.121	0.267	0.000	0.517	0.385	1.244	0.936	1.794

matrice, qui apparaît au tableau 6.8, peut être comparée aux moyennes observées par classe de DHP et par essence.

Pour passer des moyennes observées aux valeurs montrées au tableau 6.8, nous avons conduit des opérations mathématiques afin de produire un lissage plausible. Les valeurs lissées devraient produire des prédictions plus robustes au niveau des classes de DHP lors de la projection de tables de peuplement sur des bases de données indépendantes de celles utilisées pour estimer les coefficients. À partir du tableau 6.8, nous avons extrait des valeurs intéressantes afin de confectionner les tableaux 6.9 et 6.10. Les équations ont été produites pour remplacer les simples moyennes d'accroissement par classe de DHP présentées au Congrès de l'ACFAS (Carpentier et Tardif 1994).

6.3.6 Comparaison entre les accroissements prédits par la fonction CAC et les accroissements estimés par Fortin

En 1983, Fortin a estimé les taux annuels d'accroissement diamétral par classe de DHP pour les principales essences du Québec. Il s'est servi des données provenant du réseau des placettes-échantillons permanentes (PEP) du MRN. Il a réparti l'échantillon global selon trois zones bio-climatiques : la forêt feuillue, la forêt mélangée et la pessière. Dans cette section, nous comparons nos résultats avec ceux de Fortin pour les deux premières zones où l'on retrouve les peuplements de bouleau jaune à résineux.

À la figure 6.13, nous constatons que les accroissements prédits pour le bouleau jaune par Fortin (1983) sont différents entre eux et aussi de ceux prédits par la fonction CAC ou l'équation 6.3. En effet,

Tableau 6.9. Caractéristiques des accroissements en diamètre engendrés par la fonction CAC

Essence	Point de culmination en terme de DHP (cm)	Accroissement maximum atteint (cm)
BOJ	22	1,366
BOP	16	1,299
ERS	30	1,399
ERR	10	1,461
PRP	14	1,566
SAB	28	1,502
EPB	28	1,701
EPR	44	1,516
THO	36	1,074
PRU	74	1,790

Tableau 6.10 Facteurs de mouvement des tiges par classe de DHP estimés avec la fonction non linéaire d'accroissement CAC

DHP	BOJ	BOP	ERS	ERR	PRP	SAB	EPB	EPR	THO	PRU
10	0.713	0.747	0.768	0.767	0.865	0.476	0.418	0.388	0.552	0.542
12	0.762	0.790	0.798	0.835	0.987	0.577	0.544	0.461	0.579	0.555
14	0.800	0.814	0.821	0.881	1.010	0.666	0.664	0.529	0.600	0.568
16	0.826	0.821	0.839	0.908	0.953	0.743	0.771	0.591	0.618	0.582
18	0.845	0.817	0.852	0.920	0.846	0.806	0.862	0.648	0.632	0.595
20	0.856	0.803	0.863	0.918	0.716	0.857	0.938	0.699	0.644	0.609
22	0.861	0.781	0.871	0.907	0.583	0.896	0.995	0.745	0.653	0.624
24	0.861	0.754	0.876	0.887	0.459	0.923	1.036	0.785	0.661	0.638
26	0.856	0.723	0.880	0.861	0.352	0.939	1.062	0.820	0.667	0.653
28	0.848	0.690	0.882	0.830	0.264	0.947	1.072	0.851	0.671	0.668
30	0.838	0.654	0.882	0.796	0.194	0.946	1.070	0.877	0.674	0.684
32	0.824	0.618	0.881	0.759	0.140	0.938	1.057	0.899	0.676	0.700
34	0.809	0.582	0.879	0.720	0.099	0.924	1.035	0.917	0.677	0.716
36	0.792	0.546	0.876	0.681	0.070	0.905	1.005	0.931	0.677	0.732
38	0.773	0.511	0.872	0.642	0.048	0.882	0.968	0.942	0.677	0.749
40	0.754	0.477	0.867	0.604	0.033	0.855	0.927	0.949	0.675	0.766
42	0.734	0.444	0.862	0.566	0.022	0.825	0.883	0.954	0.673	0.784
44	0.713	0.412	0.856	0.529	0.015	0.794	0.836	0.956	0.670	0.802
46	0.692	0.382	0.849	0.493	0.010	0.761	0.787	0.955	0.667	0.821
48	0.670	0.353	0.842	0.459	0.007	0.727	0.739	0.952	0.664	0.840
50	0.648	0.326	0.835	0.426	0.004	0.692	0.690	0.947	0.660	0.859
52	0.627	0.301	0.827	0.395	0.003	0.658	0.642	0.941	0.655	0.879
54	0.605	0.277	0.819	0.365	0.002	0.623	0.596	0.932	0.651	0.899
56	0.584	0.255	0.810	0.338	0.001	0.589	0.551	0.922	0.646	0.920
58	0.562	0.234	0.802	0.311	0.001	0.556	0.508	0.911	0.640	0.941
60	0.542	0.215	0.793	0.287	0.000	0.523	0.467	0.898	0.635	0.962
62	0.521	0.197	0.784	0.264	0.000	0.492	0.428	0.885	0.629	0.984
64	0.501	0.180	0.774	0.243	0.000	0.461	0.392	0.870	0.623	1.007
66	0.481	0.165	0.765	0.223	0.000	0.432	0.357	0.855	0.617	1.030
68	0.462	0.151	0.755	0.204	0.000	0.404	0.325	0.839	0.611	1.054
70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
72	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
74	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MOY	0.712	0.501	0.836	0.601	0.256	0.727	0.754	0.828	0.646	0.772

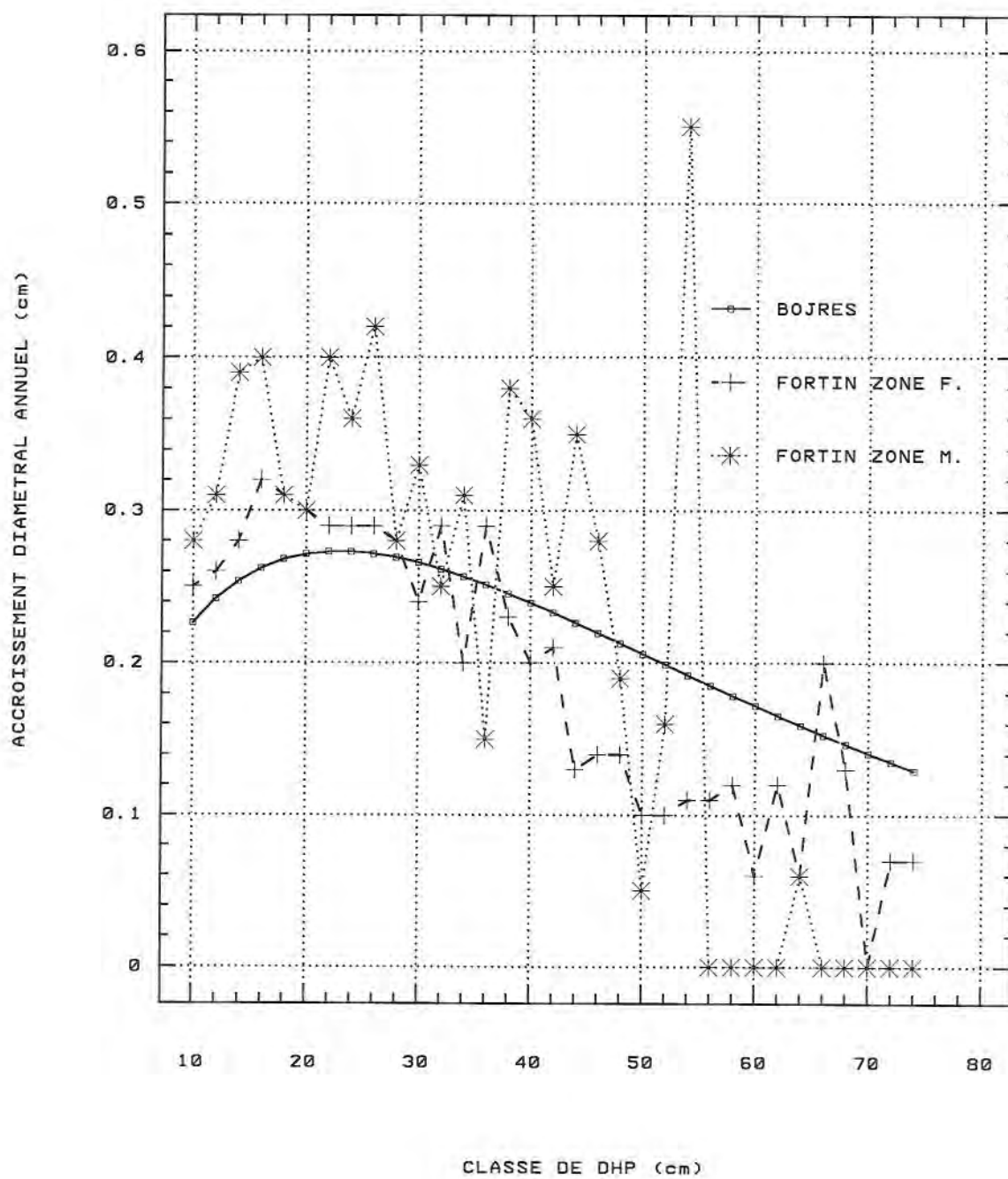


Figure 6.13. Comparaison d'accroissements par classe de DHP pour le bouleau jaune.

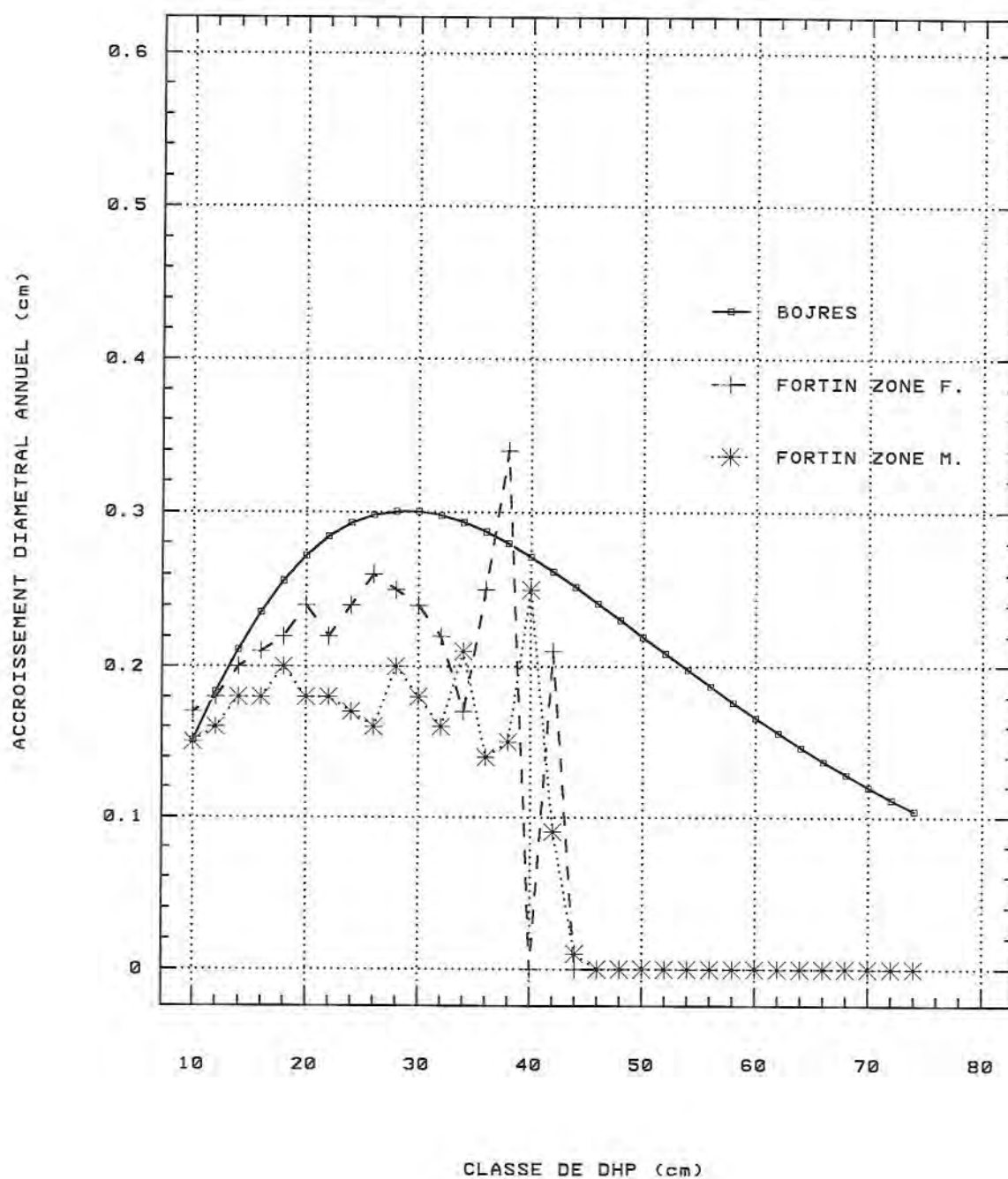


Figure 6.14. Comparaison d'accroissements par classe de DHP pour le sapin baumier.

les accroissements de Fortin dans la zone mélangée sont supérieurs à ceux qu'il a calculés pour la zone feuillue, sauf pour les fortes classes de DHP. Ces résultats surprenants s'expliquent par le fait que le bouleau jaune est mieux adapté à la zone mélangée ou bien qu'il subit moins de concurrence dans cette zone dotée pourtant d'un climat plus sévère. Dans la forêt feuillue, le bouleau jaune doit vivre en communauté avec l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) qui est l'essence dominante.

Lorsque l'on compare les prédictions de l'équation CAC avec celles de Fortin, pour les faibles DHP, les accroissements sont plus faibles. Par contre dans les fortes classes de DHP, les résultats se trouvent inversés. Cette situation peut s'expliquer par le fait que Fortin a inclus, dans ses compilations, tous les bouleaux jaunes disponibles quelles que soient la composition et les perturbations des placettes. Dans le présent travail, nous n'avons retenu que les bouleaux jaunes provenant de 101 bétulaies jaunes à résineux. Dans ces peuplements, le bouleau jaune doit occuper au moins 25 % de la surface terrière marchande. Il semble que dans ces peuplements, la concurrence entre les individus est forte dans les faibles classes de DHP tandis qu'à l'inverse, les bouleaux jaunes occupent des positions dominantes lorsque leur DHP est grand, ce qui conduit à des accroissements plus élevés. À la figure 6.14, les prédictions pour le sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.) provenant de l'équation 6.3 sont, encore une fois, différentes de celles de Fortin. Les fortes prédictions dans les classes de DHP moyennes et supérieures provenant de l'équation 6.1 sont dues au fait que nous avons rejeté de notre échantillon toutes les placettes qui étaient fortement affectées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.). Il est bien connu que ces insectes ne provoquent pas seulement l'augmentation des taux de mortalité, mais leur présence réduit aussi la croissance chez leurs hôtes.

6.3.7 Accroissements quinquennaux en diamètre par la fonction CAC

La fonction CAC a comme rôle de calculer l'accroissement diamétral sur une base quinquennale de prédiction. Nous nous en servons pour obtenir les résultats apparaissant dans le tableau 6.9 pour chaque essence et pour chaque classe de DHP. On y constate de très grandes variations entre les essences et les classes de DHP. Il y a cependant un comportement global entre les essences à signaler. Pour les faibles DHP, l'accroissement atteint des niveaux peu élevés. Ces niveaux augmentent avec la grosseur du

DHP jusqu'à un certain point. Ce point maximal de culmination de l'accroissement diffère d'une essence à l'autre.

Dans le cas de la pruche du Canada (*Tsuga canadensis* [L.] Carr.), il faudra être prudent lorsque l'on cherchera à prédire la croissance et le rendement de tiges de forts DHP car autant le niveau de culmination que le maximum atteint sont surprenants. Il est possible que le faible échantillonnage pour cette essence marginale conduise à une situation inconfortable. Des sondages supplémentaires devraient être effectués pour éclaircir ce point paradoxal.

6.4 Traduction de l'accroissement diamétral en facteur de mouvement

Par mouvement, on entend le passage de tiges d'une classe de DHP à une classe supérieure. Le facteur de mouvement est le reflet de la croissance ou encore il réfère à la proportion du nombre de tiges (NT_{ti}) au temps initial (ti) qui changent de classe. En conséquence, on obtient au temps final (tf) des tiges promues (NTP_{tf}) et des tiges non promues ($NTNP_{tf}$). Lorsque l'accroissement est plus élevé, on peut obtenir des doubles et même des triples promotions.

$$NT_{ti} = NTP_{tf} + NTNP_{tf}$$

Les facteurs de mouvement (FM) réfèrent à une base temporelle, le pas de prédiction établi à cinq ans, et à une base spatiale, la largeur de classe de DHP fixée à 2 cm. Pour notre étude, les facteurs de mouvement sont donc calculés ainsi :

$$FM = \frac{ACC \text{ quinquennal, en cm}}{Largeur \text{ de classe}} \quad (6.4)$$

où la signification de la variable FM selon ses différentes valeurs est la suivante :

- FM = 0 L'accroissement est nul et aucune tige n'est promue. Elles demeurent donc toutes dans leur classe de DHP d'origine. Elles sont dites stationnaires.
- $0 < FM \leq 1$ Une proportion FM de tiges deviennent des simples promues, donc elles montent d'une classe, alors qu'une proportion $(1-FM)$ des tiges sont non promues.
- $1 < FM \leq 2$ Une proportion $(FM-1)$ des tiges deviennent des doubles promues, donc elles montent de deux classes, alors qu'une proportion $(1-(FM-1))$ des tiges sont des simples promues. Dans ce cas, aucune tige demeure non promue.

- $2 < FM \leq 3$ Cela signifie qu'une proportion (FM-2) des tiges deviennent des triples promues, donc elles montent de trois classes, alors qu'une proportion (1-(FM-2)) deviennent des doubles promues. Dans ce cas, aucune tige demeure non promue, ou simple promue.
- $FM \geq 3$ Le même développement pourrait théoriquement s'appliquer, mais ceci nous conduirait à des complications informatiques injustifiées. Un facteur de mouvement supérieur à trois signifierait que la largeur de la classe de DHP est trop faible ou encore que le pas d'itération serait trop large. Il y a avantage à choisir un pas d'itération le plus près possible de l'intervalle moyen entre les mesures dendrométriques des placettes permanentes. Le pas d'itération devrait être maintenu sous le seuil de sept ans.

6.4.1 Facteur de mouvement résultant de l'équation d'accroissement diamétral CAC

La fonction *APL*, *FACTEURMOUV*, que l'on peut consulter dans un rapport interne de la DRF (Carpentier 1995), a servi à construire le tableau 6.10 illustré précédemment. Dans ce tableau, on retrouve, par classe de DHP et par essence, les facteurs de mouvement correspondant à la 101^e placette de notre échantillon. Les facteurs de mouvement sont identiques pour toutes les placettes puisqu'ils reposent sur une seule série de coefficients par essence (tableaux 6.3 et 6.5) et que la seule variable de prédiction, le centre des classes de DHP de 10 à 74 cm, est commune à toutes les placettes lorsque l'on est au stade des prédictions.

Dans les classes de DHP de 70, 72 et 74 cm, les facteurs de mouvement (FM) ont été fixés arbitrairement à zéro pour éviter de perdre des tiges. En effet, des simples, des doubles ou des triples promues qui passeraient à une classe supérieure à la classe 74 seraient perdues par nos manipulations matricielles et engendreraient des pertes importantes en volume. Nous choisissons de perdre un peu d'accroissement plutôt que de perdre des tiges au complet. Lorsque nous bénéficierons d'ordinateurs plus puissants, il deviendra facile d'allonger le vecteur des centres de classe de DHP jusqu'à 100 cm. Encore faut-il qu'il y ait suffisamment de données dans cette zone extrême de DHP pour pouvoir établir une image réaliste des accroissements moyens.

6.5 Accroissement en surface terrière

Dans le but d'améliorer la qualité des prédictions, nous allons maintenant introduire de nouvelles variables explicatives pour rendre compte de la situation particulière de chacune des tiges. Dans un premier temps, nous allons illustrer l'effet des variables les plus prometteuses pour ensuite les inclure en série, si elles sont significatives, dans un modèle biologiquement acceptable. Dans cette section, nous utilisons l'accroissement en surface terrière plutôt que l'accroissement diamétral comme variable dépendante. Le tableau 6.11 fournit un résumé des observations de l'accroissement en surface terrière par essence et par placette pour la période de croissance 1-2. Les sommations pour toutes les classes de DHP sont montrées pour les 50 premières placettes de l'échantillon et pour chacune des dix essences principales. La présence de nombreux zéros s'explique principalement par le fait que l'on observe très rarement plus de cinq essences différentes dans une même placette. Ce tableau est élaboré par la fonction *APL*, *CACSTPL* qui peut être consultée dans un rapport interne de la DRF (Carpentier 1995).

Le modèle de régression non linéaire choisi pour la prédiction de l'accroissement en surface terrière est un modèle essentiellement multiplicatif et flexible auquel on a apporté un coefficient additif (β_1). On le dit flexible parce qu'on peut y inclure, selon l'essence, toutes les variables explicatives et tous les coefficients qui améliorent statistiquement son pouvoir de prédiction. Le modèle peut contenir au maximum cinq variables explicatives et huit coefficients. L'équation générale retenue est la suivante :

$$ACC_{STM} = \beta_1 + \beta_2 [EXP(\beta_3 STM^{0.5})] [EXP(\beta_4 STS)] [EXP(\beta_5 RDHP)] [EXP(\beta_6 (1 - EXP(\beta_7 DHP) - \beta_8 DHPM))] + \varepsilon \quad (6.5)$$

Dans ce modèle, l'interprétation des variables indépendantes est celle qui a été présentée à la section 6.3.1. Le sigle ε représente le terme d'erreur.

Dans les tableaux 6.12 et 6.14, on retrouve tous les coefficients retenus de même que les tests usuels d'inférence statistique. Nous n'avons retenu que les coefficients significativement différents de zéro, sauf dans trois exceptions. Nous avons toléré ces exceptions afin de corriger des anomalies dans certaines

Tableau 6.11 Accroissement annuel observé en surface terrière (mètres carrés)
par essence et par placette pour la période de croissance 1-2

NOPL	BOJ	BOP	ERS	ERR	PRP	SAB	EPB	ERR	THO	PRU
452171081	0.0099	0.0000	0.0000	0.0043	0.0000	0.0035	0.0000	0.0000	0.0017	0.0000
454274442	0.0061	0.0035	0.0000	0.0000	0.0000	0.0007	0.0070	0.0000	0.0000	0.0000
454376162	0.0018	0.0000	0.0043	0.0020	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0061
454574142	0.0101	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0014	0.0000	0.0001	0.0063	0.0052
460274581	0.0018	0.0000	0.0000	0.0071	0.0000	0.0005	0.0000	0.0000	0.0021	0.0066
460274582	0.0046	0.0000	0.0063	0.0000	0.0000	0.0014	0.0006	0.0000	0.0012	0.0029
460874452	0.0063	0.0000	0.0035	0.0000	0.0000	0.0015	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017
461274301	0.0070	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0053	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
461373462	0.0070	0.0000	0.0009	0.0011	0.0000	0.0074	0.0000	0.0039	0.0000	0.0000
461476081	0.0051	0.0010	0.0007	0.0000	0.0000	0.0074	0.0019	0.0000	0.0000	0.0000
461476082	0.0098	0.0040	0.0000	0.0000	0.0000	0.0041	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
461574151	0.0056	0.0000	0.0004	0.0000	0.0000	0.0057	0.0042	0.0000	0.0000	0.0000
461675431	0.0011	0.0000	0.0016	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0060
461874442	0.0037	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0048	0.0001	0.0000	0.0003	0.0000
462278332	0.0078	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0036
462377512	0.0046	0.0000	0.0009	0.0005	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000	0.0156	0.0000
462577192	0.0055	0.0000	0.0000	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0097	0.0006
462674411	0.0090	0.0000	0.0000	0.0014	0.0000	0.0048	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000
462675161	0.0086	0.0000	0.0032	0.0013	0.0000	0.0006	0.0000	0.0012	0.0000	0.0000
463378091	0.0084	0.0000	0.0015	0.0004	0.0000	0.0023	0.0021	0.0000	0.0107	0.0000
463378092	0.0030	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0058	0.0100
463577592	0.0051	0.0011	0.0000	0.0008	0.0000	0.0000	0.0007	0.0000	0.0099	0.0000
463674551	0.0064	0.0000	0.0027	0.0005	0.0000	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0007
463878061	0.0076	0.0021	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0002	0.0000	0.0071	0.0000
463973282	0.0075	0.0032	0.0000	0.0036	0.0000	0.0081	0.0000	0.0012	0.0000	0.0000
464074572	0.0080	0.0071	0.0000	0.0000	0.0000	0.0058	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000
464178171	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0053	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000
464178392	0.0056	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0005	0.0000	0.0053	0.0000
464278191	0.0038	0.0038	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0023	0.0000	0.0000	0.0000
464278481	0.0011	0.0000	0.0063	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0134
464478361	0.0034	0.0022	0.0000	0.0000	0.0000	0.0026	0.0005	0.0000	0.0080	0.0000
464573051	0.0077	0.0000	0.0000	0.0009	0.0000	0.0088	0.0000	0.0052	0.0000	0.0000
464574501	0.0066	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0197	0.0000	0.0031	0.0000	0.0000
464775082	0.0058	0.0000	0.0056	0.0017	0.0000	0.0042	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
464873122	0.0071	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
464972142	0.0081	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0023	0.0000	0.0029
464978421	0.0028	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0064	0.0053	0.0000	0.0016	0.0000
464978422	0.0048	0.0015	0.0000	0.0034	0.0000	0.0064	0.0000	0.0000	0.0000	0.0026
465072382	0.0036	0.0008	0.0020	0.0000	0.0000	0.0027	0.0000	0.0017	0.0000	0.0000
465174421	0.0117	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0065	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
465274132	0.0093	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0061	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
465371431	0.0059	0.0000	0.0004	0.0043	0.0000	0.0068	0.0000	0.0011	0.0000	0.0000
465474421	0.0066	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0037	0.0003	0.0000	0.0011	0.0000
465674401	0.0072	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0054	0.0066	0.0000	0.0027	0.0000
465872011	0.0055	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0043	0.0080	0.0000	0.0000	0.0000
465873162	0.0052	0.0000	0.0000	0.0051	0.0000	0.0146	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
465974191	0.0040	0.0000	0.0000	0.0012	0.0007	0.0033	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000
465974342	0.0074	0.0000	0.0000	0.0037	0.0000	0.0083	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
465976422	0.0106	0.0000	0.0009	0.0000	0.0000	0.0019	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
470073072	0.0069	0.0029	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0059	0.0009	0.0000	0.0000
470074292	0.0042	0.0024	0.0000	0.0000	0.0000	0.0099	0.0041	0.0000	0.0000	0.0000
470175101	0.0012	0.0000	0.0000	0.0016	0.0000	0.0035	0.0005	0.0000	0.0044	0.0000
470272081	0.0076	0.0000	0.0036	0.0047	0.0000	0.0120	0.0000	0.0003	0.0000	0.0000
470272132	0.0064	0.0000	0.0000	0.0015	0.0000	0.0059	0.0010	0.0081	0.0000	0.0003
470379061	0.0053	0.0013	0.0000	0.0004	0.0000	0.0012	0.0000	0.0000	0.0047	0.0000
470471222	0.0082	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000	0.0121	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tableau 6.12. Coefficients des régressions non linéaires pour l'estimation de l'accroissement annuel en surface terrière pour les essences feuillues.

Essence : bouleau jaune

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_2	0,001080	0,000244	4,411
β_3	-1,168513	0,123188	-9,485
β_5	0,380618	0,077577	4,906
β_6	0,231023	0,107820	2,142
β_7	-0,161936	0,047848	-3,384
β_8	0,854159	0,070650	12,090

Essence : bouleau à papier

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_2	0,000726	0,000143	5,069
β_6	0,231100	0,108568	2,128
β_7	-0,158908	0,045311	-3,507
β_8	0,927409	0,064234	14,438

Essence : érable à sucre

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_2	0,001657	0,000290	5,704
β_6	0,139373	0,020835	6,689
β_7	-0,059525	0,019743	-3,014
β_8	0,881017	0,101983	8,638

Essence : érable rouge

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_2	0,027722	0,029974	0,924
β_3	-6,397097	1,207813	-5,296
β_4	3,284194	0,751788	4,368
β_6	0,392134	0,072068	5,441
β_7	-0,099509	0,021845	-4,555
β_8	0,771583	0,104320	7,396

Essence : cerisier de Pennsylvanie

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_2	0,000253	0,000225	1,123
β_3	-1,715925	0,790860	-2,169
β_7	-0,492567	0,167179	-2,946
β_8	0,878500	0,044258	19,849

Tableau 6.13. Tables d'analyse de la variance pour les régressions non linéaires de l'estimation de l'accroissement annuel en surface terrière, pour les essences feuillues

Essence : bouleau jaune

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	0,00096	6	0,00016	455,354
Erreur	0,00030	865	0,00000	
Total	0,00127	871		
Total (corr.)	0,00047	870		
$R^2 = 0,3580$				

Essence : bouleau à papier

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	0,00010	4	0,00002	219,793
Erreur	0,00002	197	0,00000	
Total	0,00012	201		
Total (corr.)	0,00003	200		
$R^2 = 0,2339$				

Essence : érable à sucre

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	0,00009	4	0,00002	146,032
Erreur	0,00002	109	0,00000	
Total	0,00011	113		
Total (corr.)	0,00004	112		
$R^2 = 0,5436$				

Essence : érable rouge

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	0,00011	6	0,00001	81,079
Erreur	0,00004	175	0,00000	
Total	0,00016	181		
Total (corr.)	0,00006	180		
$R^2 = 0,3491$				

Essence : cerisier de Pennsylvanie

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	0,00001	4	0,00003	32,400
Erreur	0,00000	29	0,00000	
Total	0,00001	33		
Total (corr.)	0,00000	32		
$R^2 = 0,3504$				

Tableau 6.14. Coefficients des régressions non linéaires pour l'estimation de l'accroissement annuel en surface terrière pour les essences résineuses

Essence : sapin baumier

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_2	0,000322	0,000080	4,026
β_3	-1,237012	0,116360	-10,630
β_5	0,945734	0,128983	7,332
β_6	0,479648	0,341236	1,405
β_7	-0,260545	0,077519	-3,361
β_8	0,876725	0,095953	9,137

Essence : épinette blanche

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	0,000270	0,000102	2,633
β_2	0,003461	0,001414	2,447
β_7	-0,153644	0,012341	-12,449
β_8	1,033392	0,021713	47,593

Essence : épinette rouge

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_2	0,001280	0,000460	2,779
β_6	0,250638	0,072451	3,459
β_7	-0,070134	0,031417	-2,232
β_8	0,862061	0,151322	5,696

Essence : thuya occidental

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_2	0,001055	0,000182	5,795
β_6	0,182549	0,039950	4,569
β_7	-0,077421	0,014651	-5,284
β_8	0,897725	0,044884	20,001

Essence : pruche du Canada

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_2	0,001372	0,000442	3,098
β_6	0,143660	0,018922	7,592
β_7	-0,024645	0,012012	-2,051
β_8	0,610626	0,195340	3,125

Tableau 6.15. Tables d'analyse de la variance pour les régressions non linéaires de l'estimation de l'accroissement annuel en surface terrière, pour les essences résineuses

Essence : sapin baumier

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	0,0004	6	0,00008	504,960
Erreur	0,0002	1014	0,00000	
Total	0,0006	1020		
Total (corr.)	0,0003	1019		
$R^2 = 0,4453$				

Essence : épinette blanche

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	0,00019	4	0,00005	121,202
Erreur	0,00005	131	0,00000	
Total	0,00024	135		
Total (corr.)	0,00011	134		
$R^2 = 0,5107$				

Essence : épinette rouge

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	0,00004	4	0,00001	60,856
Erreur	0,00001	72	0,00000	
Total	0,00005	76		
Total (corr.)	0,00002	75		
$R^2 = 0,5108$				

Essence : thuya occidental

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	0,00019	4	0,00005	218,095
Erreur	0,00005	236	0,00000	
Total	0,00024	240		
Total (corr.)	0,00008	239		
$R^2 = 0,3989$				

Essence : pruche du Canada

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	0,000200	4	0,00005	91,627
Erreur	0,000045	83	0,00000	
Total	0,000245	87		
Total (corr.)	0,000129	86		
$R^2 = 0,6489$				

Tableau 6.16 Coefficients de l'équation générale d'accroissement annuel en surface terrière selon les essences

NOMS DES VARIABLES AFFECTÉES DIRECTEMENT PAR UN COEFFICIENT								
			STM	STS	RDHP		DHP	DHPM
ESS	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
BOJ	0.00000	0.00108	-1.16851	0.00000	0.38062	0.23102	-0.16194	0.85416
BOP	0.00000	0.00073	0.00000	0.00000	0.00000	0.23110	-0.15891	0.92741
ERS	0.00000	0.00166	0.00000	0.00000	0.00000	0.13937	-0.05953	0.88102
ERR	0.00000	0.02772	-6.39710	3.28419	0.00000	0.39213	-0.09951	0.77158
PRP	0.00000	0.00025	-1.71593	0.00000	0.00000	1.00000	-0.49257	0.87850
SAB	0.00000	0.00032	-1.23701	0.00000	0.94573	0.47965	-0.26055	0.87673
EPB	0.00027	0.00346	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	-0.15364	1.03339
EPR	0.00000	0.00128	0.00000	0.00000	0.00000	0.25064	-0.07013	0.86206
THO	0.00000	0.00106	0.00000	0.00000	0.00000	0.18255	-0.07742	0.89773
PRU	0.00000	0.00137	0.00000	0.00000	0.00000	0.14366	-0.02465	0.61063

prédictions lorsque des variables explicatives devraient prendre des valeurs exceptionnelles dans le simulateur pour une essence donnée. Dans ces rares occasions, on obtenait des prédictions aberrantes pour certaines essences secondaires.

En consultant les tableaux 6.13 et 6.15, on remarque que les résultats des régressions sont satisfaisants dans l'ensemble. Les valeurs de la statistique R^2 sont pratiquement le double de celles que nous avons présentées aux tableaux 6.4 et 6.6. Le tableau 6.16 nous montre les coefficients des équations qui ont été retenus pour chaque essence. Nous y avons également indiqué le nom de la variable affectée directement par le coefficient concerné. Les valeurs entières, zéro et un, affectées à des coefficients signifient que ces coefficients n'ont pas été retenus. En procédant ainsi, on peut se servir d'un modèle généralisé pour toutes les essences même si l'une ou l'autre des variables n'est pas retenue.

Nous avons vérifié le comportement de l'équation 6.5 (CAST) au niveau de chacune des essences. Nous avons constaté que globalement les valeurs prédites sont semblables aux valeurs observées. Les transpositions des coefficients du logiciel de régression à celui utilisé pour la conception du modèle se sont opérées sans erreur. C'est également vrai pour la codification des équations dans le langage de programmation APL. Les résultats de cette vérification sont montrés au tableau 6.17.

6.5.1 Facteurs de mouvement résultant de l'équation d'accroissement en surface terrière CAST

Nous avons vu à la section 6.4 comment un accroissement diamétral pouvait être transformé en un facteur de mouvement. À partir d'une équation dotée d'une seule variable explicative, en l'occurrence le DHP moyen de la classe, on obtient une matrice unique de facteurs de mouvement pour une essence

Tableau 6.17 Biais des prédictions de l'accroissement en surface terrière par essence en utilisant la fonction de régression non linéaire CAST

ESSENCE	OBSERVÉ (m ²)	ACCROISSEMENT POUR LA PÉRIODE 1-2 PRÉDIT (m ²)	BIAIS (m ²)	BIAIS EN %
BOJ	0.83071	0.83135	0.00064	0.077
BOP	0.13468	0.13466	-0.00002	-0.012
ERS	0.08949	0.08944	-0.00005	-0.053
ERR	0.13011	0.12843	-0.00168	-1.292
PRP	0.01998	0.02003	0.00005	0.235
SAB	0.59764	0.60313	0.00549	0.918
EPB	0.13644	0.13644	0.00000	-0.001
EPR	0.04608	0.04592	-0.00016	-0.337
THO	0.19096	0.19027	-0.00069	-0.363
PRU	0.10050	0.10066	0.00016	0.159
TOT	2.27660	2.28034	0.00374	0.002

donnée. Cette matrice est malheureusement stationnaire et non dynamique. Si on inclut entre autres, la variable de la surface terrière marchande (STM) comme variable explicative dans l'équation de prédiction de l'accroissement, la matrice devient alors variable d'une placette à l'autre puisque nous y avons ajouté une variable « placette ». De plus, la matrice des facteurs de mouvement devient également dynamique si on l'utilise itérativement étant donné que la surface terrière marchande évolue dans le temps. À la suite de l'inclusion de la variable « surface terrière marchande » dans l'équation de prédiction de l'accroissement, on obtient des facteurs de mouvement plus faibles dans les placettes où la STM est plus forte. Ainsi, pour une placette donnée dont le volume est en évolution positive, les facteurs de mouvement diminueront d'une itération à l'autre. À l'inverse, à la suite d'une coupe d'éclaircie ou d'une mortalité faible, la surface terrière marchande diminue et, comme conséquence, l'accroissement et les facteurs de mouvement augmentent.

L'inclusion d'une variable explicative « arbre individuel », comme la surface terrière supérieure (STS) ou encore la variable RDHP obtenue par le quotient DHP/DHPM, rend la matrice dynamique en fonction de la structure toutes essences de chacune des placettes. La structure toutes essences réfère à la distribution des tiges par classe de DHP. Ainsi, une tige de bouleau jaune de 20 cm, qui est la tige la plus grosse dans une placette donnée, se trouve dotée d'une STS nulle et d'un quotient RDHP élevé. Cette dernière tige bénéficie d'un facteur de mouvement beaucoup plus élevé qu'une autre tige de bouleau jaune de 20 cm, localisée dans une placette mature où le DHPM est de l'ordre de 30 cm. Afin d'illustrer les facteurs de mouvement engendrés par l'équation 6.5 (CAST) nous avons préparé le tableau 6.18 sur les facteurs de mouvement de la placette n° 1 pour chaque essence. Les tableaux 6.19 et 6.20 montrent, respectivement pour le bouleau jaune et le sapin baumier, des facteurs de mouvement différents d'une placette à l'autre. Les facteurs de mouvement deviennent donc particuliers

Tableau 6.18 Facteurs de mouvement des tiges d'une classe de DHP aux classes immédiatement supérieures par essence et par classe de DHP en utilisant la fonction d'accroissement en surface terrière CAST

DHP	BOJ	BOP	ERS	ERR	PRP	SAB	EPB	EPR	THO	PRU
10	0.815	0.819	1.002	0.849	1.419	0.637	0.616	0.418	0.572	0.900
12	0.932	0.906	1.015	1.150	1.321	0.797	0.601	0.497	0.623	0.852
14	1.014	0.955	1.032	1.446	1.186	0.903	0.658	0.579	0.670	0.823
16	1.065	0.971	1.050	1.599	1.060	0.970	0.769	0.660	0.711	0.804
18	1.093	0.964	1.066	1.778	0.953	1.012	0.903	0.739	0.746	0.793
20	1.102	0.940	1.078	1.856	0.864	1.041	1.032	0.811	0.773	0.787
22	1.100	0.907	1.087	1.652	0.790	1.064	1.136	0.877	0.793	0.785
24	1.090	0.868	1.093	1.266	0.727	1.086	1.209	0.934	0.806	0.785
26	1.076	0.827	1.094	0.903	0.673	1.109	1.251	0.982	0.813	0.788
28	1.060	0.787	1.092	0.939	0.626	1.136	1.266	1.021	0.814	0.791
30	1.043	0.747	1.087	0.763	0.586	1.166	1.261	1.052	0.811	0.796
32	1.027	0.710	1.078	0.593	0.551	1.201	1.241	1.074	0.804	0.801
34	1.011	0.675	1.067	0.457	0.519	1.241	1.211	1.089	0.793	0.806
36	0.998	0.642	1.054	0.454	0.491	1.286	1.175	1.097	0.780	0.812
38	0.985	0.612	1.039	0.449	0.466	1.336	1.136	1.100	0.766	0.817
40	0.975	0.584	1.023	0.442	0.443	1.392	1.095	1.097	0.750	0.823
42	0.966	0.558	1.005	0.433	0.422	1.453	1.055	1.091	0.733	0.828
44	0.959	0.534	0.987	0.423	0.404	1.520	1.016	1.080	0.715	0.833
46	0.953	0.512	0.967	0.413	0.387	1.593	0.978	1.067	0.697	0.837
48	0.949	0.491	0.948	0.402	0.371	1.673	0.942	1.052	0.679	0.841
50	0.946	0.473	0.928	0.391	0.356	1.760	0.907	1.035	0.661	0.845
52	0.944	0.455	0.908	0.380	0.343	1.854	0.875	1.017	0.644	0.848
54	0.944	0.439	0.888	0.369	0.330	1.956	0.845	0.997	0.626	0.850
56	0.945	0.423	0.868	0.359	0.319	2.066	0.816	0.977	0.610	0.853
58	0.947	0.409	0.848	0.349	0.308	2.185	0.789	0.957	0.593	0.854
60	0.950	0.396	0.829	0.339	0.298	2.314	0.764	0.937	0.577	0.855
62	0.954	0.383	0.810	0.329	0.288	2.452	0.740	0.916	0.562	0.856
64	0.959	0.371	0.792	0.320	0.279	2.602	0.717	0.896	0.547	0.856
66	0.965	0.360	0.774	0.311	0.271	2.764	0.696	0.876	0.533	0.855
68	0.972	0.350	0.756	0.303	0.263	2.938	0.676	0.856	0.519	0.854
70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
72	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
74	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MOY	0.991	0.636	0.975	0.724	0.577	1.550	0.946	0.926	0.691	0.828

Tableau 6.19 Facteurs de mouvement des tiges d'une classe de DHP aux classes supérieures pour les BOJ des 10 premières placettes en utilisant la fonction d'accroissement en surface terrière CAST

DHP		PL1	PL2	PL3	PL4	PL5	PL6	PL7	PL8	PL9	PL10
10		0.815	1.226	0.549	0.601	0.654	0.573	0.593	1.374	1.274	0.866
12		0.932	1.331	0.674	0.690	0.747	0.688	0.720	1.523	1.424	1.017
14		1.014	1.399	0.770	0.754	0.812	0.773	0.816	1.624	1.527	1.128
16		1.065	1.439	0.837	0.794	0.853	0.831	0.882	1.684	1.589	1.200
18		1.093	1.458	0.877	0.815	0.874	0.865	0.921	1.713	1.620	1.241
20		1.102	1.462	0.897	0.823	0.882	0.880	0.940	1.721	1.629	1.258
22		1.100	1.457	0.902	0.822	0.880	0.882	0.943	1.715	1.624	1.258
24		1.090	1.447	0.896	0.814	0.872	0.875	0.937	1.701	1.610	1.247
26		1.076	1.436	0.884	0.803	0.860	0.863	0.924	1.682	1.591	1.230
28		1.060	1.423	0.869	0.791	0.847	0.848	0.908	1.662	1.570	1.210
30		1.043	1.412	0.852	0.778	0.834	0.832	0.890	1.642	1.549	1.188
32		1.027	1.403	0.834	0.766	0.821	0.816	0.872	1.623	1.530	1.167
34		1.011	1.396	0.817	0.754	0.809	0.800	0.855	1.607	1.512	1.146
36		0.998	1.391	0.800	0.743	0.798	0.785	0.838	1.593	1.497	1.127
38		0.985	1.388	0.785	0.734	0.789	0.772	0.823	1.582	1.484	1.109
40		0.975	1.388	0.770	0.725	0.781	0.759	0.808	1.574	1.473	1.094
42		0.966	1.391	0.757	0.718	0.774	0.748	0.796	1.568	1.465	1.080
44		0.959	1.396	0.746	0.712	0.768	0.738	0.784	1.565	1.460	1.068
46		0.953	1.403	0.735	0.707	0.764	0.729	0.774	1.565	1.457	1.057
48		0.949	1.413	0.726	0.704	0.760	0.721	0.765	1.567	1.456	1.049
50		0.946	1.425	0.718	0.701	0.758	0.715	0.757	1.571	1.458	1.042
52		0.944	1.439	0.711	0.700	0.757	0.709	0.750	1.578	1.461	1.036
54		0.944	1.455	0.705	0.699	0.757	0.705	0.745	1.586	1.467	1.032
56		0.945	1.473	0.699	0.699	0.758	0.701	0.740	1.597	1.474	1.029
58		0.947	1.493	0.695	0.700	0.760	0.698	0.736	1.610	1.483	1.027
60		0.950	1.515	0.691	0.702	0.762	0.696	0.733	1.625	1.494	1.027
62		0.954	1.539	0.688	0.704	0.766	0.695	0.731	1.641	1.506	1.027
64		0.959	1.565	0.686	0.707	0.770	0.694	0.729	1.659	1.520	1.028
66		0.965	1.593	0.685	0.711	0.775	0.694	0.728	1.679	1.535	1.031
68		0.972	1.623	0.684	0.716	0.781	0.695	0.728	1.701	1.553	1.034
70		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
72		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
74		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MOY		0.991	1.439	0.765	0.736	0.794	0.759	0.806	1.618	1.510	1.102

Tableau 6.20 Facteurs de mouvement des tiges d'une classe de DHP aux classes supérieures pour les SAB des 10 premières placettes en utilisant la fonction d'accroissement en surface terrière CAST

DHP		PL1	PL2	PL3	PL4	PL5	PL6	PL7	PL8	PL9	PL10
10		0.637	0.880	0.497	0.465	0.499	0.487	0.520	1.030	0.953	0.722
12		0.797	1.055	0.667	0.585	0.624	0.639	0.690	1.254	1.169	0.927
14		0.903	1.179	0.782	0.665	0.707	0.740	0.804	1.408	1.315	1.064
16		0.970	1.271	0.849	0.714	0.760	0.799	0.871	1.513	1.412	1.146
18		1.012	1.343	0.884	0.745	0.793	0.832	0.906	1.587	1.478	1.193
20		1.041	1.409	0.900	0.765	0.815	0.849	0.924	1.647	1.530	1.220
22		1.064	1.473	0.906	0.781	0.834	0.858	0.932	1.703	1.576	1.238
24		1.086	1.542	0.909	0.795	0.851	0.865	0.937	1.760	1.622	1.254
26		1.109	1.618	0.912	0.811	0.870	0.871	0.942	1.823	1.672	1.270
28		1.136	1.703	0.916	0.829	0.891	0.880	0.948	1.893	1.729	1.289
30		1.166	1.799	0.922	0.850	0.916	0.890	0.956	1.971	1.793	1.311
32		1.201	1.906	0.930	0.874	0.944	0.903	0.968	2.060	1.865	1.338
34		1.241	2.025	0.941	0.901	0.976	0.919	0.982	2.159	1.946	1.370
36		1.286	2.159	0.955	0.932	1.012	0.938	0.999	2.270	2.036	1.406
38		1.336	2.308	0.972	0.967	1.052	0.960	1.019	2.393	2.137	1.447
40		1.392	2.474	0.992	1.005	1.096	0.984	1.042	2.529	2.248	1.493
42		1.453	2.657	1.014	1.047	1.145	1.012	1.068	2.679	2.370	1.544
44		1.520	2.860	1.038	1.094	1.198	1.042	1.097	2.843	2.505	1.600
46		1.593	3.000	1.066	1.144	1.257	1.076	1.129	3.000	2.652	1.661
48		1.673	3.000	1.096	1.199	1.321	1.113	1.164	3.000	2.813	1.728
50		1.760	3.000	1.129	1.259	1.390	1.152	1.202	3.000	2.988	1.800
52		1.854	3.000	1.165	1.324	1.465	1.196	1.243	3.000	3.000	1.878
54		1.956	3.000	1.203	1.394	1.546	1.242	1.288	3.000	3.000	1.963
56		2.066	3.000	1.244	1.470	1.634	1.292	1.335	3.000	3.000	2.054
58		2.185	3.000	1.289	1.552	1.730	1.346	1.387	3.000	3.000	2.151
60		2.314	3.000	1.336	1.640	1.832	1.403	1.441	3.000	3.000	2.256
62		2.452	3.000	1.387	1.736	1.943	1.465	1.500	3.000	3.000	2.369
64		2.602	3.000	1.441	1.838	2.063	1.530	1.563	3.000	3.000	2.490
66		2.764	3.000	1.499	1.949	2.193	1.600	1.629	3.000	3.000	2.619
68		2.938	3.000	1.560	2.068	2.332	1.675	1.701	3.000	3.000	2.758
70		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
72		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
74		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MOY		1.550	2.255	1.047	1.113	1.223	1.052	1.106	2.351	2.227	1.619

à une essence, à une placette et même à une classe de DHP donnée. De plus, ces facteurs de mouvement sont dynamiques dans le temps car ils varient d'une itération à l'autre.

6.5.2 Transformation d'un accroissement en surface terrière vers un facteur de mouvement

Autant il est simple de transformer un accroissement diamétral en facteur de mouvement, autant le travail devient plus complexe lorsque l'accroissement est prédit en terme de surface terrière. La différence de surface terrière d'une classe à l'autre forme une progression quadratique. Le tableau 6.21 illustre les opérations nécessaires pour transformer l'accroissement en surface terrière prédit en facteur de mouvement pour le bouleau jaune de la placette n° 101.

6.5.3 Ordinogramme de logiciel *BOJRES*

Dans les derniers chapitres, nous avons analysé les relations Hauteur-DHP puis les trois composantes qui expliquent la dynamique des peuplements forestiers. L'assemblage logique des équations de prédiction constitue le logiciel *BOJRES*. La figure 6.15 présente l'ordinogramme du modèle de prédiction *BOJRES*.

Tableau 6.21 Transformation d'accroissements en surface terrière par classe de DHP en des facteurs de mouvement

DHP INF. (cm)	DHP SUP. (cm)	DHP DIFF. (cm)	SURFACE TERRIERE			ACCR. EN ST. PLACETTE 101 (m*2)	FACTEUR DE MOUVEMENT
(1)	(2)	(3) (2)-(1)	(4) (m*2)	(5) (m*2)	(6) (5)-(4)	(7)	(8) (7)÷(6)
10	12	2	0.0079	0.0113	0.0035	0.0030	0.8717
12	14	2	0.0113	0.0154	0.0041	0.0038	0.9309
14	16	2	0.0154	0.0201	0.0047	0.0046	0.9690
16	18	2	0.0201	0.0254	0.0053	0.0053	0.9909
18	20	2	0.0254	0.0314	0.0060	0.0060	1.0012
20	22	2	0.0314	0.0380	0.0066	0.0066	1.0040
22	24	2	0.0380	0.0452	0.0072	0.0072	1.0023
24	26	2	0.0452	0.0531	0.0079	0.0078	0.9983
26	28	2	0.0531	0.0616	0.0085	0.0084	0.9938
28	30	2	0.0616	0.0707	0.0091	0.0090	0.9896
30	32	2	0.0707	0.0804	0.0097	0.0096	0.9865
32	34	2	0.0804	0.0908	0.0104	0.0102	0.9849
34	36	2	0.0908	0.1018	0.0110	0.0108	0.9849
36	38	2	0.1018	0.1134	0.0116	0.0115	0.9869
38	40	2	0.1134	0.1257	0.0123	0.0121	0.9907
40	42	2	0.1257	0.1385	0.0129	0.0128	0.9964
42	44	2	0.1385	0.1521	0.0135	0.0136	1.0040
44	46	2	0.1521	0.1662	0.0141	0.0143	1.0134
46	48	2	0.1662	0.1810	0.0148	0.0151	1.0247
48	50	2	0.1810	0.1963	0.0154	0.0160	1.0378
50	52	2	0.1963	0.2124	0.0160	0.0169	1.0527
52	54	2	0.2124	0.2290	0.0167	0.0178	1.0693
54	56	2	0.2290	0.2463	0.0173	0.0188	1.0876
56	58	2	0.2463	0.2642	0.0179	0.0198	1.1077
58	60	2	0.2642	0.2827	0.0185	0.0209	1.1294
60	62	2	0.2827	0.3019	0.0192	0.0221	1.1529
62	64	2	0.3019	0.3217	0.0198	0.0233	1.1781
64	66	2	0.3217	0.3421	0.0204	0.0246	1.2051
66	68	2	0.3421	0.3632	0.0210	0.0260	1.2338
68	70	2	0.3632	0.3848	0.0217	0.0274	1.2644
70	72	2	0.3848	0.4072	0.0223	0.0289	1.2968
72	74	2	0.4072	0.4301	0.0229	0.0305	1.3310
74	76	2	0.4301	0.4536	0.0236	0.0322	1.3672

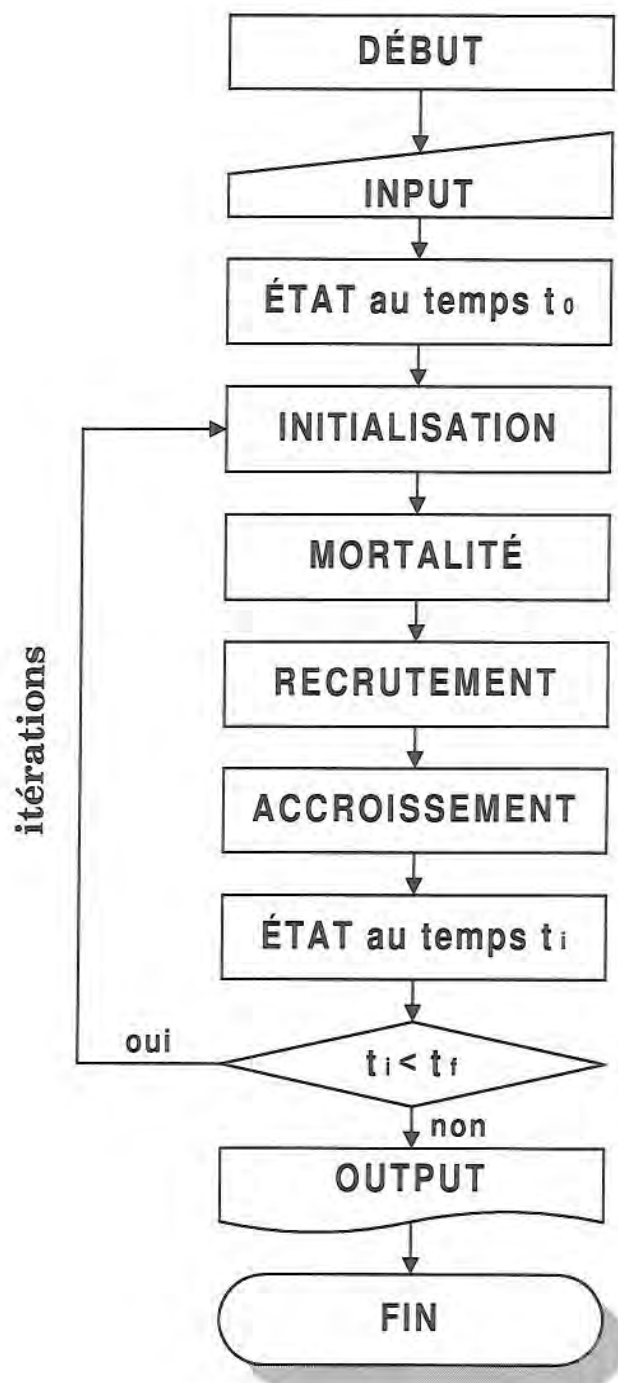


Figure 6.15. Ordinogramme du logiciel de prédiction *BOJRES*

Chapitre sept

Résultats et validation

7.1 Description du simulateur *BOJRES*

Le but principal de cette recherche était la conception d'un simulateur de croissance original, dédié spécifiquement à un type de peuplement mélangé : la bétulaie jaune à résineux. Ce simulateur, appelé *BOJRES*, constitue un logiciel informatique implémenté en langage *APL PLUS III*. Le logiciel comprend environ 200 lignes de programmation et fait appel à plus d'une centaine de fonctions utilitaires. Le logiciel est conçu en vue d'une utilisation interactive. Ainsi, il produit des prédictions sur demande sur une placette donnée. Il existe une deuxième version du logiciel pour traiter en lot un grand nombre de placettes. Dans les deux cas, les intrants du système sont des tables de peuplement ainsi que la hauteur moyenne des tiges dominantes ou codominantes des placettes.

7.2 Résultats des simulations

Dans les deux prochaines sections, nous montrons deux types de résultats; ceux obtenus pour des prédictions à court terme impliquant les 101 placettes correspondantes, ayant servi à la calibration du modèle et d'autres obtenus pour des prédictions à long terme impliquant quatre placettes de configurations relativement différentes.

7.2.1 Prédictions à court terme

Une durée moyenne de prédiction (PAS) de 7,35 ans constitue une période de prédiction à court terme. Afin de faciliter les tests statistiques de validation, nous utilisons une durée de prédiction variable d'une placette à l'autre. En effet, la durée de simulation est celle-là même qui a été calculée d'après la différence entre deux dates d'observation sur le terrain. La méthodologie de détermination de ces durées spécifiques à chacune des placettes est expliquée à la section 2.4.4.

Pour illustrer des exemples de prédiction, les résultats obtenus pour le bouleau jaune et le sapin baumier de la placette n° 11 se trouvent aux tableaux 7.1 et 7.2 respectivement. Dans ces derniers, en colonne 1, 2 et 3, on trouve respectivement le centre des classes de DHP, le nombre d'itérations et la durée de la prédiction. La table de peuplement aux conditions initiales occupe la colonne 4 tandis que les colonnes 5 et 6 montrent respectivement les valeurs de la surface terrière (mètres carrés par placette) et du volume marchand brut (mètres cubes par placette). Enfin, les conditions finales apparaissent aux colonnes 12, 13 et 14. Ces dernières proviennent de l'intégration des résultats obtenus par les trois composantes : mortalité, recrutement et accroissement des survivants. Les prédictions primaires des fonctions apparaissent en nombre de tiges par placette aux colonnes 7, 8 et 10 respectivement. Dans les colonnes 7, 8, 9 et 10, on trouve respectivement les nombres de tiges mortes, de tiges recrues, de tiges survivantes et de tiges promues. En colonne 11, on trouve le résultat de l'accroissement des survivants en surface terrière exprimé en mètres carrés par placette.

À la dernière ligne débutant par le mot « TOTAL », dans le bas des tableaux 7.1 et 7.2, on retrouve les sommations pour l'ensemble des classes de DHP. Ces sommations sont conservées pour l'ensemble des 101 placettes et des dix essences principales dans le but d'être présentées dans les prochains tableaux. Seules les 47 premières placettes apparaissent aux tableaux 7.3 à 7.12. Ensuite, au tableau 7.13, on présente une sommation des résultats pour toutes les essences confondues pour l'ensemble des placettes. Un résumé de l'information disponible concernant les 101 placettes apparaît à la dernière ligne des tableaux 7.3 à 7.13. Ces résumés sont reportés au tableau 7.14

Tableau 7.1 Résultats de la projection d'une table de peuplement pour l'essence BOJ et pour la placette numéro 11

CONDITIONS INIT.						DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
CL	IT	AN-	N.	STM	VMB	MORT	REC.	SURV.	TIGES	ACCR.	N.	STM	VMB	ACCR
DHP	NÉES		TIG.	m*2	m*3				PR.	SURV.	TIG.	m*2	m*3	VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
10	1	7	8.00	0.06	0.15	0.47	1.00	8.53	0.00	-0.05	1.74	0.01	0.03	-0.11
12	1	7	4.00	0.05	0.13	0.21	0.00	3.79	6.80	0.03	6.88	0.08	0.22	0.09
14	1	7	6.00	0.09	0.31	0.29	0.00	5.71	3.70	-0.03	3.70	0.06	0.19	-0.12
16	1	7	1.00	0.02	0.07	0.04	0.00	0.96	5.56	0.09	5.56	0.11	0.41	0.34
18	1	7	1.00	0.03	0.10	0.04	0.00	0.96	1.06	0.00	1.06	0.03	0.11	0.01
20	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	0.03	0.95	0.03	0.12	0.12
22	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.07	0.00	0.01	0.01
24	1	7	1.00	0.05	0.21	0.04	0.00	0.96	0.00	-0.04	0.00	0.00	0.00	-0.21
26	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	0.05	0.90	0.05	0.22	0.22
28	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.06	0.00	0.02	0.02
30	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
38	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
44	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
46	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
48	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
52	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
54	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
56	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
58	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
62	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
64	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
66	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
68	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
72	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
74	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL			21.00	0.29	0.96	1.09	1.00	20.91	19.09	0.09	20.91	0.37	1.34	0.38

pour être confrontés à des sommations semblables provenant des observations de terrain. Ce dernier tableau montre donc des résultats globaux de prédiction correspondant à une durée moyenne de prédiction de 7,35 années.

Pour chaque essence, les prédictions se retrouvent dans le voisinage des valeurs observées pour chacun des trois phénomènes de croissance. Nous avons comparé également les résultats obtenus pour chaque placette. Par souci de brièveté, seuls les résultats détaillés, selon les phénomènes d'évolution pour le bouleau jaune et pour les 50 premières placettes, sont illustrés aux tableaux 7.15, 7.16 et 7.17. Pour

les autres essences, seules des compilations sommaires pour les trois phénomènes sont présentées aux tableaux 7.18, 7.19 et 7.20.

7.2.2 Prédictions à long terme

Il est possible d'obtenir des prédictions à long terme en se servant du modèle de manière itérative. Les variables d'état doivent être actualisées à chaque itération pour conserver un certain réalisme dans les prédictions pour chacune des composantes et aussi pour chacune des essences. Il ne faut pas oublier que des variables « peuplement » (pour toutes les essences confondues) gouvernent, en partie, les différents taux de changement. Afin de ne pas multiplier indûment le nombre de tableaux, nous montrons unique-

Tableau 7.2 Résultats de la projection d'une table de peuplement pour l'essence SAB et pour la placette numéro 11

CONDITIONS INIT.			DYNAMIQUE DES TIGES								CONDITIONS FINALES			
CL	IT	AN-	N.	STM	VMB	MORT	REC.	SURV.	TIGES	ACCR.	N.	STM	VMB	ACCR
DHP	NÉES		TIG.	m*2	m*3				PR.	SURV.	TIG.	m*2	m*3	VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
10	1	7	3.00	0.02	0.04	0.31	0.67	3.37	0.00	-0.01	1.64	0.01	0.02	-0.02
12	1	7	1.00	0.01	0.03	0.10	0.00	0.90	1.72	0.01	1.93	0.02	0.06	0.03
14	1	7	2.00	0.03	0.11	0.19	0.00	1.81	0.69	-0.01	0.95	0.01	0.05	-0.06
16	1	7	1.00	0.02	0.08	0.10	0.00	0.90	1.55	0.01	1.62	0.03	0.13	0.05
18	1	7	1.00	0.03	0.11	0.10	0.00	0.90	0.83	0.00	0.86	0.02	0.09	-0.02
20	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.03	0.88	0.03	0.13	0.13
22	1	7	1.00	0.04	0.18	0.12	0.00	0.88	0.00	-0.03	0.00	0.00	0.00	-0.18
24	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	0.04	0.81	0.04	0.18	0.18
26	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.06	0.00	0.02	0.02
28	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	1	7	1.00	0.07	0.35	0.22	0.00	0.78	0.00	-0.06	0.00	0.00	0.00	-0.35
32	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.04	0.54	0.04	0.22	0.22
34	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.02	0.25	0.02	0.11	0.11
36	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
38	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
44	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
46	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
48	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
52	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
54	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
56	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
58	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
62	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
64	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
66	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
68	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
72	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
74	1	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL			10.00	0.22	0.91	1.13	0.67	9.55	7.33	0.04	9.55	0.24	1.01	0.10

ment les résultats à long terme pour la placette déjà traitée à la section 7.2.1. Dans un premier temps, nous produisons les résultats par classe de DHP pour la deuxième itération pour les seules essences : bouleau jaune et sapin baumier.

Les résultats de la première itération ont été montrés aux tableaux 7.1 et 7.2 pour le bouleau jaune et le sapin baumier de la placette n° 11. Ces derniers sont considérés comme des résultats à court terme. Nous montrons au tableau 7.21 les résultats de la deuxième itération pour le bouleau jaune. Dans ce tableau, on trouve aux colonnes 4, 5 et 6 concernant les conditions initiales, le nombre de tiges vivantes, la surface terrière marchande et le volume marchand

brut qui apparaissent comme conditions finales respectivement aux colonnes 12, 13 et 14 lors de la première itération. Par la suite, on retrouve de nouvelles valeurs prédites en colonnes 12, 13 et 14 dans ce même tableau. On constate également que les taux de changement des différents phénomènes sont légèrement modifiés et que l'ensemble conduit à un nouvel état. Cet exercice doit être exécuté pour les neuf autres essences susceptibles de composer la placette pour compléter cette deuxième itération. Le logiciel *BOJRES* étant construit de façon à pouvoir itérer un grand nombre de fois, ceci permet donc de visualiser l'évolution d'un peuplement à long terme et d'évaluer ainsi la souplesse et la robustesse du modèle.

Tableau 7.3 Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence BOJ

CONDITIONS INIT.			DYNAMIQUE DES TIGES								CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR. VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1	1	7	10	0.4	2.5	0.5	0.8	10.3	9.3	0.073	10.3	0.5	3.0	0.51
2	1	8	13	0.1	0.4	0.8	1.4	13.6	12.2	0.063	13.6	0.2	0.8	0.37
3	1	7	3	0.3	2.6	0.2	0.0	2.8	2.2	0.026	2.8	0.3	2.7	0.06
4	1	8	9	0.6	4.2	0.5	0.1	8.6	6.7	0.059	8.6	0.6	4.5	0.33
5	1	8	5	0.4	3.2	0.4	0.0	4.6	3.8	0.038	4.6	0.4	3.2	0.05
6	1	8	6	0.6	4.2	0.6	0.0	5.4	3.9	0.038	5.4	0.5	4.0	-0.26
7	1	8	12	0.5	3.4	0.7	0.3	11.6	9.5	0.064	11.6	0.5	3.8	0.40
8	1	8	7	0.2	1.1	0.3	1.2	7.8	6.7	0.075	7.8	0.3	1.7	0.59
9	1	11	6	0.3	1.3	0.4	1.1	6.8	5.6	0.070	6.8	0.3	1.8	0.44
10	1	7	4	0.2	1.0	0.2	0.8	4.6	3.8	0.036	4.6	0.2	1.2	0.20
11	1	7	21	0.3	1.0	1.1	1.0	20.9	19.1	0.086	20.9	0.4	1.4	0.47
12	1	12	7	0.3	2.0	0.5	0.9	7.4	6.5	0.075	7.4	0.4	2.5	0.57
13	1	8	3	0.3	3.0	0.3	0.0	2.7	2.1	0.025	2.7	0.3	2.9	-0.04
14	1	8	3	0.2	1.1	0.2	0.9	3.7	2.8	0.033	3.7	0.2	1.3	0.17
15	1	7	19	0.5	2.7	0.8	0.6	18.8	14.0	0.080	18.8	0.5	3.3	0.61
16	1	7	10	0.3	1.6	0.6	0.5	9.8	6.4	0.033	9.8	0.3	1.6	0.01
17	1	7	6	0.3	2.0	0.3	0.1	5.8	3.8	0.031	5.8	0.3	2.1	0.17
18	1	8	14	0.4	2.5	0.9	0.9	14.0	12.7	0.076	14.0	0.5	2.9	0.37
19	1	7	4	0.2	1.5	0.2	0.7	4.5	3.8	0.033	4.5	0.3	1.6	0.15
20	1	7	12	0.6	3.4	0.6	0.0	11.4	6.2	0.047	11.4	0.6	3.6	0.19
21	1	7	5	0.4	3.0	0.3	0.0	4.7	3.2	0.031	4.7	0.4	3.1	0.19
22	1	7	4	0.1	0.5	0.2	0.9	4.7	3.4	0.018	4.7	0.1	0.6	0.12
23	1	7	13	0.7	4.7	0.7	0.2	12.5	8.2	0.061	12.5	0.7	4.9	0.21
24	1	7	9	0.4	2.4	0.6	0.3	8.7	5.6	0.033	8.7	0.4	2.2	-0.23
25	1	10	7	0.3	1.8	0.4	0.8	7.4	6.6	0.070	7.4	0.4	2.2	0.45
26	1	7	14	0.4	2.2	0.7	0.3	13.7	9.4	0.057	13.7	0.5	2.6	0.37
27	1	7	3	0.1	0.6	0.1	0.9	3.8	2.9	0.029	3.8	0.1	0.8	0.20
28	1	7	12	0.3	1.8	0.5	0.7	12.2	9.7	0.057	12.2	0.4	2.2	0.41
29	1	7	8	0.3	1.5	0.3	0.7	8.4	7.2	0.048	8.4	0.3	1.9	0.36
30	1	7	2	0.5	5.6	0.4	0.0	1.6	0.6	0.007	1.6	0.4	4.1	-1.58
31	1	6	8	0.2	0.8	0.3	0.8	8.4	6.4	0.035	8.4	0.2	1.0	0.23
32	1	10	7	0.5	3.1	0.5	0.2	6.7	6.5	0.061	6.7	0.5	3.4	0.37
33	1	13	6	0.3	1.7	0.5	1.1	6.6	5.5	0.081	6.6	0.4	2.2	0.53
34	1	7	4	0.5	3.9	0.4	0.1	3.7	2.9	0.031	3.7	0.5	3.5	-0.42
35	1	10	8	0.3	1.9	0.5	0.9	8.4	7.5	0.081	8.4	0.4	2.6	0.67
36	1	10	5	0.7	7.1	0.7	0.0	4.3	4.3	0.065	4.3	0.7	6.8	-0.30
37	1	7	3	0.5	3.1	0.3	0.1	2.8	2.3	0.031	2.8	0.4	3.0	-0.17
38	1	7	4	0.4	2.8	0.3	0.3	3.9	2.9	0.028	3.9	0.4	2.7	-0.10
39	1	10	3	0.2	1.7	0.2	0.9	3.7	2.8	0.051	3.7	0.3	2.1	0.31
40	1	8	10	0.6	4.2	0.6	0.5	9.9	9.1	0.082	9.9	0.7	4.6	0.43
41	1	11	6	0.9	5.6	1.0	0.0	5.0	5.0	0.081	5.0	0.8	5.1	-0.54
42	1	7	5	0.6	4.7	0.4	0.1	4.8	3.8	0.043	4.8	0.5	4.7	0.00
43	1	9	8	1.0	7.8	1.0	0.0	7.0	5.3	0.055	7.0	0.8	6.4	-1.38
44	1	8	5	0.3	2.1	0.3	0.6	5.3	4.7	0.042	5.3	0.3	2.4	0.25
45	1	10	6	0.1	0.4	0.4	1.5	7.1	5.6	0.044	7.1	0.1	0.7	0.32
46	1	10	5	0.3	2.0	0.4	0.7	5.2	4.6	0.049	5.2	0.4	2.2	0.13
47	1	11	8	0.7	4.0	1.1	0.6	7.5	6.9	0.081	7.5	0.6	3.2	-0.84
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR. VMB
101	PEP		671	36.3	237.5	45	61	687	550	5.013	687	37.8	250.4	13.0

Tableau 7.4 Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence BOP

CONDITIONS INIT.			DYNAMIQUE DES TIGES								CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.000	0.2	0.0	0.0	0.00
2	1	8	4	0.1	0.3	0.2	0.9	4.7	3.8	0.021	4.7	0.1	0.5	0.18
3	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
4	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
5	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
6	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
7	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
8	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.000	0.3	0.0	0.0	0.01
9	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	0.000	0.4	0.0	0.0	0.01
10	1	7	1	0.1	0.6	0.1	0.1	1.0	0.6	0.007	1.0	0.1	0.6	0.02
11	1	7	6	0.2	1.0	0.3	0.7	6.4	5.1	0.032	6.4	0.2	1.2	0.24
12	1	12	0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.000	0.3	0.0	0.0	0.01
13	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
14	1	8	1	0.1	0.6	0.1	0.2	1.2	0.8	0.008	1.2	0.1	0.6	0.02
15	1	7	2	0.1	0.6	0.1	0.3	2.2	1.3	0.009	2.2	0.1	0.7	0.06
16	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
17	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
18	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.000	0.2	0.0	0.0	0.00
19	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.000	0.2	0.0	0.0	0.00
20	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
21	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
22	1	7	1	0.0	0.0	0.1	0.4	1.3	0.8	0.003	1.3	0.0	0.1	0.03
23	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
24	1	7	3	0.2	1.3	0.2	0.2	2.9	2.3	0.019	2.9	0.2	1.3	0.04
25	1	10	4	0.0	0.1	0.5	1.1	4.6	3.5	0.017	4.6	0.1	0.2	0.11
26	1	7	19	0.3	1.2	1.1	1.0	18.9	16.6	0.075	18.9	0.3	1.7	0.52
27	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.000	0.3	0.0	0.0	0.00
28	1	7	2	0.1	0.4	0.0	0.4	2.4	1.7	0.011	2.4	0.1	0.5	0.10
29	1	7	10	0.3	1.5	0.3	0.8	10.5	8.2	0.049	10.5	0.3	1.9	0.41
30	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
31	1	6	2	0.0	0.2	0.1	0.4	2.4	1.6	0.008	2.4	0.0	0.2	0.06
32	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
33	1	13	1	0.0	0.1	0.1	0.6	1.5	0.9	0.009	1.5	0.0	0.2	0.07
34	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.000	0.2	0.0	0.0	0.00
35	1	10	1	0.0	0.1	0.0	0.4	1.4	1.0	0.008	1.4	0.0	0.2	0.08
36	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.000	0.2	0.0	0.0	0.00
37	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.000	0.2	0.0	0.0	0.00
38	1	7	2	0.0	0.2	0.1	0.4	2.3	1.5	0.008	2.3	0.0	0.3	0.06
39	1	10	1	0.0	0.0	0.1	0.6	1.5	0.9	0.003	1.5	0.0	0.1	0.03
40	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.000	0.2	0.0	0.0	0.00
41	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.000	0.2	0.0	0.0	0.00
42	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.000	0.2	0.0	0.0	0.00
43	1	9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
44	1	8	1	0.0	0.3	0.0	0.3	1.3	1.0	0.008	1.3	0.0	0.3	0.07
45	1	10	1	0.0	0.1	0.0	0.5	1.5	1.0	0.008	1.5	0.0	0.2	0.07
46	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.000	0.3	0.0	0.0	0.00
47	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.000	0.3	0.0	0.0	0.00
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
101	PEP		168	4.3	23.4	11	41	198	143	0.918	198	5.1	28.3	5.0

Tableau 7.5 Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence ERS

CONDITIONS INIT.						DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
2	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
3	1	7	5	0.1	0.9	0.2	0.6	5.4	3.9	0.024	5.4	0.2	1.1	0.18
4	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
5	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
6	1	8	7	0.2	1.0	0.2	0.9	7.6	6.3	0.038	7.6	0.2	1.2	0.24
7	1	8	7	0.3	2.4	0.3	0.9	7.6	6.5	0.054	7.6	0.4	2.9	0.49
8	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
9	1	11	1	0.0	0.1	0.1	0.3	1.2	0.9	0.010	1.2	0.0	0.2	0.06
10	1	7	1	0.0	0.0	0.0	0.2	1.2	0.9	0.004	1.2	0.0	0.1	0.02
11	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
12	1	12	1	0.0	0.0	0.0	0.3	1.3	1.0	0.006	1.3	0.0	0.1	0.04
13	1	8	2	0.1	0.4	0.1	0.2	2.1	1.1	0.007	2.1	0.1	0.4	0.05
14	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
15	1	7	1	0.1	0.3	0.1	0.2	1.1	0.9	0.008	1.1	0.1	0.4	0.06
16	1	7	1	0.0	0.2	0.1	0.1	1.1	0.9	0.007	1.1	0.0	0.2	0.04
17	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
18	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
19	1	7	5	0.1	0.3	0.1	0.6	5.5	4.9	0.022	5.5	0.1	0.4	0.13
20	1	7	2	0.0	0.2	0.1	0.1	2.1	1.7	0.009	2.1	0.1	0.3	0.05
21	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
22	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
23	1	7	7	0.2	0.9	0.2	0.7	7.5	6.5	0.035	7.5	0.2	1.1	0.22
24	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
25	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
26	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
27	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
28	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
29	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
30	1	7	6	0.4	3.2	0.2	0.5	6.3	4.0	0.039	6.3	0.4	3.4	0.22
31	1	6	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
32	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
33	1	13	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
34	1	7	6	0.2	1.0	0.3	0.7	6.4	5.1	0.032	6.4	0.2	1.2	0.17
35	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
36	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
37	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
38	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
39	1	10	1	0.1	0.4	0.1	0.3	1.2	0.9	0.012	1.2	0.1	0.5	0.06
40	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
41	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
42	1	7	1	0.0	0.0	0.0	0.2	1.2	1.0	0.003	1.2	0.0	0.0	0.02
43	1	9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
44	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
45	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
46	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
47	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
101	PEP		80	2.7	16.5	3	17	94	70	0.491	94	3.2	20.0	3.4

Tableau 7.6 Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence ERR

CONDITIONS INIT.				DYNAMIQUE DES TIGES							CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1	1	7	4	0.1	0.2	0.5	0.8	4.3	3.4	0.023	4.3	0.1	0.3	0.14
2	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
3	1	7	2	0.0	0.1	0.2	0.3	2.1	1.6	0.006	2.1	0.0	0.1	0.04
4	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
5	1	8	10	0.3	1.5	1.0	0.5	9.4	8.0	0.055	9.4	0.3	1.8	0.27
6	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
7	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
8	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
9	1	11	2	0.0	0.0	0.4	0.5	2.1	1.6	0.011	2.1	0.0	0.1	0.05
10	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
11	1	7	1	0.0	0.0	0.1	0.1	1.0	0.8	0.003	1.0	0.0	0.0	0.02
12	1	12	1	0.2	1.2	0.7	0.1	0.4	0.1	0.001	0.4	0.1	0.4	0.81
13	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
14	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
15	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
16	1	7	2	0.0	0.0	0.3	0.3	2.1	1.5	0.006	2.1	0.0	0.1	0.03
17	1	7	3	0.0	0.0	0.4	0.5	3.0	1.7	0.006	3.0	0.0	0.1	0.03
18	1	8	1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.9	0.9	0.008	0.9	0.0	0.1	0.04
19	1	7	1	0.1	0.8	0.4	0.0	0.6	0.4	0.005	0.6	0.1	0.6	0.26
20	1	7	1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.9	0.9	0.006	0.9	0.0	0.1	0.03
21	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
22	1	7	1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.9	0.9	0.005	0.9	0.0	0.1	0.03
23	1	7	3	0.0	0.1	0.4	0.5	3.1	1.9	0.008	3.1	0.0	0.1	0.04
24	1	7	1	0.0	0.0	0.1	0.2	1.0	0.5	0.002	1.0	0.0	0.0	0.01
25	1	10	7	0.1	0.4	1.1	1.8	7.7	5.6	0.029	7.7	0.1	0.5	0.15
26	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
27	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
28	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
29	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
30	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
31	1	6	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
32	1	10	1	0.0	0.0	0.2	0.2	1.0	0.8	0.003	1.0	0.0	0.0	0.01
33	1	13	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
34	1	7	1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.9	0.9	0.005	0.9	0.0	0.1	0.02
35	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
36	1	10	2	0.1	0.8	0.3	0.0	1.7	1.7	0.046	1.7	0.1	1.2	0.35
37	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
38	1	7	9	0.2	1.1	0.7	1.0	9.3	8.2	0.054	9.3	0.3	1.3	0.29
39	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
40	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
41	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
42	1	7	8	0.2	0.9	0.9	1.3	8.3	6.3	0.033	8.3	0.2	1.1	0.17
43	1	9	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
44	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
45	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
46	1	10	6	0.1	0.3	0.9	1.6	6.7	5.1	0.040	6.7	0.1	0.5	0.20
47	1	11	1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.9	0.9	0.021	0.9	0.1	0.3	0.08
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
101	PEP		126	2.8	13.8	17	24	133	97	0.657	133	3.2	15.9	2.1

Tableau 7.7 Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence PRP

CONDITIONS INIT.						DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
2	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
3	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
4	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
5	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
6	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
7	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
8	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.000	0.2	0.0	0.0	0.00
9	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
10	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
11	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
12	1	12	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
13	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
14	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
15	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
16	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
17	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
18	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
19	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
20	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
21	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
22	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
23	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
24	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
25	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
26	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
27	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
28	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
29	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
30	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
31	1	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
32	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
33	1	13	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
34	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
35	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
36	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
37	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
38	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
39	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.000	0.2	0.0	0.0	0.00
40	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
41	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
42	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
43	1	9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
44	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
45	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
46	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
47	1	11	1	0.0	0.1	0.1	0.9	1.8	0.9	0.016	1.8	0.0	0.2	0.10
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
101	PEP		25	0.3	1.2	3	18	40	18	0.123	40	0.6	2.2	1.0

Tableau 7.8 Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence SAB

CONDITIONS INIT.						DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1	1	7	5	0.2	0.9	0.6	0.7	5.1	4.1	0.028	5.1	0.2	1.0	0.13
2	1	8	2	0.0	0.1	0.2	1.2	3.0	1.8	0.009	3.0	0.0	0.2	0.07
3	1	7	0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.3	0.0	0.000	1.3	0.0	0.0	0.02
4	1	8	7	0.1	0.4	0.7	0.6	6.9	3.9	0.017	6.9	0.1	0.5	0.11
5	1	8	4	0.1	0.2	0.4	0.3	3.9	2.3	0.010	3.9	0.1	0.3	0.06
6	1	8	8	0.2	1.1	1.1	0.5	7.4	4.6	0.027	7.4	0.2	1.1	0.00
7	1	8	3	0.1	0.6	0.4	0.4	3.0	2.0	0.013	3.0	0.1	0.7	0.04
8	1	8	5	0.1	0.4	0.6	1.5	5.9	4.4	0.031	5.9	0.1	0.6	0.22
9	1	11	9	0.2	1.1	1.4	1.4	9.0	7.6	0.066	9.0	0.3	1.4	0.30
10	1	7	6	0.2	0.8	0.7	1.1	6.4	5.1	0.037	6.4	0.2	1.0	0.15
11	1	7	10	0.2	0.9	1.1	0.7	9.5	7.3	0.043	9.5	0.2	1.1	0.18
12	1	12	16	0.3	1.6	2.7	2.5	15.8	12.9	0.080	15.8	0.3	1.9	0.30
13	1	8	0	0.0	0.0	0.0	1.5	1.5	0.0	0.000	1.5	0.0	0.0	0.03
14	1	8	3	0.2	1.0	0.5	0.7	3.2	2.5	0.033	3.2	0.2	1.0	0.06
15	1	7	0	0.0	0.0	0.0	1.1	1.1	0.0	0.000	1.1	0.0	0.0	0.02
16	1	7	4	0.1	0.2	0.4	0.4	4.0	2.3	0.011	4.0	0.1	0.3	0.06
17	1	7	1	0.0	0.0	0.1	0.7	1.6	0.4	0.001	1.6	0.0	0.0	0.02
18	1	8	9	0.3	1.7	1.1	0.8	8.7	7.9	0.055	8.7	0.3	1.9	0.25
19	1	7	5	0.1	0.3	0.5	1.2	5.7	4.1	0.020	5.7	0.1	0.5	0.13
20	1	7	12	0.1	0.5	1.1	0.3	11.2	4.8	0.020	11.2	0.2	0.6	0.10
21	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.8	0.0	0.000	0.8	0.0	0.0	0.01
22	1	7	4	0.1	0.7	0.5	0.7	4.2	2.8	0.019	4.2	0.1	0.7	0.05
23	1	7	11	0.2	1.1	1.1	0.6	10.5	5.3	0.028	10.5	0.2	1.2	0.07
24	1	7	4	0.1	0.8	0.5	0.3	3.8	2.5	0.016	3.8	0.1	0.8	-0.01
25	1	10	22	0.3	1.3	2.9	2.9	22.0	17.4	0.088	22.0	0.4	1.7	0.47
26	1	7	16	0.5	2.6	1.8	0.0	14.2	9.3	0.060	14.2	0.5	2.8	0.17
27	1	7	3	0.1	0.5	0.3	0.9	3.6	2.7	0.025	3.6	0.1	0.7	0.13
28	1	7	3	0.1	0.4	0.3	0.5	3.2	2.1	0.012	3.2	0.1	0.4	0.08
29	1	7	0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.3	0.0	0.000	1.3	0.0	0.0	0.02
30	1	7	1	0.0	0.0	0.1	0.6	1.5	0.3	0.001	1.5	0.0	0.0	0.02
31	1	6	11	0.1	0.4	0.9	0.9	11.0	6.3	0.026	11.0	0.2	0.6	0.16
32	1	10	18	0.4	1.8	2.6	1.8	17.2	12.2	0.067	17.2	0.4	2.1	0.24
33	1	13	24	0.4	1.7	4.3	4.8	24.4	19.7	0.134	24.4	0.5	2.4	0.69
34	1	7	10	0.2	1.0	1.0	1.1	10.1	6.2	0.033	10.1	0.2	1.1	0.10
35	1	10	2	0.0	0.1	0.3	1.8	3.5	1.7	0.011	3.5	0.1	0.2	0.10
36	1	10	1	0.0	0.4	0.2	0.6	1.4	0.8	0.009	1.4	0.1	0.4	0.04
37	1	7	9	0.2	0.7	0.8	1.3	9.5	6.3	0.032	9.5	0.2	0.9	0.17
38	1	7	9	0.1	0.5	0.8	1.1	9.3	4.9	0.022	9.3	0.1	0.6	0.12
39	1	10	4	0.1	0.9	0.8	1.3	4.6	3.2	0.039	4.6	0.2	1.0	0.08
40	1	8	14	0.3	1.2	1.6	1.7	14.1	10.4	0.054	14.1	0.3	1.5	0.29
41	1	11	7	0.2	1.0	1.3	1.7	7.5	5.5	0.048	7.5	0.2	1.1	0.11
42	1	7	10	0.1	0.4	0.9	1.2	10.2	5.5	0.023	10.2	0.1	0.6	0.16
43	1	9	21	0.4	2.0	2.5	2.0	20.5	11.6	0.060	20.5	0.4	2.2	0.19
44	1	8	8	0.2	1.2	1.0	1.2	8.2	6.6	0.040	8.2	0.2	1.3	0.15
45	1	10	6	0.1	0.6	0.9	1.6	6.7	5.1	0.040	6.7	0.2	0.8	0.25
46	1	10	18	0.4	2.0	2.5	2.4	17.9	15.0	0.101	17.9	0.5	2.4	0.40
47	1	11	4	0.1	0.5	0.6	1.6	4.9	3.4	0.032	4.9	0.1	0.6	0.13
NO PL.	IT NÉES	AN-	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
101	PEP		920	18.2	88.5	115	145	949	641	4.032	949	20.8	105.8	17.3

Tableau 7.9 Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence EPB

CONDITIONS INIT.						DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
2	1	8	5	0.2	1.4	0.3	0.0	4.7	4.5	0.057	4.7	0.3	1.9	0.45
3	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
4	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
5	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
6	1	8	1	0.1	0.4	0.1	0.1	1.1	0.9	0.010	1.1	0.1	0.4	0.06
7	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
8	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
9	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
10	1	7	1	0.1	0.6	0.0	0.1	1.1	1.0	0.012	1.1	0.1	0.6	0.06
11	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
12	1	12	2	0.1	1.1	0.2	0.3	2.1	1.8	0.031	2.1	0.2	1.3	0.23
13	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
14	1	8	1	0.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.9	0.007	1.0	0.0	0.3	0.04
15	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
16	1	7	1	0.0	0.0	0.1	0.1	1.0	0.6	0.002	1.0	0.0	0.1	0.02
17	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
18	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
19	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
20	1	7	4	0.2	1.2	0.2	0.1	3.9	2.4	0.018	3.9	0.2	1.3	0.12
21	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
22	1	7	1	0.2	1.7	0.0	0.0	1.0	0.8	0.014	1.0	0.3	1.8	0.08
23	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
24	1	7	1	0.0	0.1	0.1	0.1	1.0	0.7	0.004	1.0	0.0	0.2	0.02
25	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
26	1	7	5	0.1	0.4	0.3	0.2	4.9	4.0	0.021	4.9	0.1	0.5	0.14
27	1	7	1	0.1	0.5	0.0	0.1	1.1	1.0	0.010	1.1	0.1	0.6	0.06
28	1	7	1	0.1	0.5	0.0	0.1	1.1	1.0	0.012	1.1	0.1	0.6	0.09
29	1	7	2	0.2	1.5	0.1	0.1	2.0	1.9	0.024	2.0	0.2	1.7	0.17
30	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
31	1	6	1	0.0	0.0	0.1	0.1	1.0	0.6	0.003	1.0	0.0	0.1	0.02
32	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
33	1	13	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
34	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
35	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
36	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
37	1	7	4	0.1	0.7	0.2	0.2	4.0	2.9	0.019	4.0	0.1	0.8	0.11
38	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
39	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
40	1	8	2	0.0	0.0	0.1	0.2	2.0	1.3	0.005	2.0	0.0	0.1	0.03
41	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
42	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
43	1	9	2	0.0	0.1	0.1	0.2	2.0	1.2	0.005	2.0	0.0	0.1	0.03
44	1	8	3	0.3	2.3	0.2	0.0	2.8	2.8	0.034	2.8	0.3	2.5	0.21
45	1	10	4	0.3	1.8	0.3	0.0	3.7	3.7	0.064	3.7	0.3	2.2	0.48
46	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
47	1	11	1	0.0	0.3	0.1	0.1	1.1	0.9	0.010	1.1	0.1	0.3	0.04
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
101	PEP		120	5.3	33.4	7	7	120	93	0.894	120	5.9	39.1	5.7

Tableau 7.10 Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence EPR

CONDITIONS INIT.					DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES					
NO PL.	IT (1)	AN- (2)	N. NÉES (3)	N. TIG. (4)	STM m*2 (5)	VMB m*3 (6)	N. MORT (7)	N. REC. (8)	N. SURV. (9)	TIG. PR. (10)	ACCR. SURV. (11)	N. TIG. (12)	STM m*2 (13)	VMB m*3 (14)	ACCR VMB (15)
1	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
2	1	8		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
3	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
4	1	8		1	0.0	0.1	0.1	0.1	1.0	0.5	0.003	1.0	0.0	0.1	0.02
5	1	8		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
6	1	8		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
7	1	8		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
8	1	8		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
9	1	11		6	0.1	0.6	0.5	0.0	5.5	5.3	0.035	5.5	0.2	0.9	0.23
10	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
11	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
12	1	12		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
13	1	8		0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
14	1	8		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
15	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
16	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
17	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
18	1	8		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
19	1	7		3	0.1	0.7	0.1	0.2	3.1	2.3	0.017	3.1	0.1	0.8	0.13
20	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
21	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
22	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
23	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
24	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
25	1	10		2	0.0	0.1	0.2	0.1	1.9	1.7	0.009	1.9	0.0	0.2	0.06
26	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
27	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
28	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
29	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
30	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
31	1	6		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
32	1	10		10	0.3	1.9	0.7	0.3	9.6	7.5	0.063	9.6	0.4	2.4	0.54
33	1	13		6	0.1	0.4	0.8	1.5	6.7	5.2	0.032	6.7	0.1	0.6	0.22
34	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
35	1	10		0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
36	1	10		3	0.1	0.5	0.3	0.0	2.7	1.5	0.013	2.7	0.1	0.7	0.14
37	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
38	1	7		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
39	1	10		1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.9	0.8	0.005	0.9	0.0	0.2	0.03
40	1	8		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
41	1	11		0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
42	1	7		3	0.0	0.1	0.2	1.2	4.0	1.3	0.006	4.0	0.0	0.2	0.06
43	1	9		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
44	1	8		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
45	1	10		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
46	1	10		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
47	1	11		0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.000	0.1	0.0	0.0	0.00
NO PL.	IT AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB		
101	PEP		59	1.6	9.3	5	6	60	47	0.359	60	2.0	12.2	2.9	

Tableau 7.11 Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence THO

CONDITIONS INIT.						DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1	1	7	1	0.0	0.2	0.0	0.1	1.1	0.8	0.006	1.1	0.0	0.2	0.04
2	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
3	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
4	1	8	6	0.3	1.8	0.1	0.5	6.4	4.8	0.040	6.4	0.4	2.1	0.29
5	1	8	6	0.1	0.6	0.3	0.6	6.2	4.5	0.025	6.2	0.2	0.7	0.14
6	1	8	1	0.1	0.3	0.0	0.1	1.1	0.9	0.008	1.1	0.1	0.4	0.05
7	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
8	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
9	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
10	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
11	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
12	1	12	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
13	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
14	1	8	1	0.0	0.1	0.1	0.1	1.1	0.6	0.003	1.1	0.0	0.1	0.02
15	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
16	1	7	18	0.7	3.6	0.7	1.0	18.3	13.0	0.092	18.3	0.8	4.1	0.50
17	1	7	17	0.8	3.8	0.4	0.7	17.3	11.0	0.086	17.3	0.8	4.3	0.54
18	1	8	1	0.1	0.3	0.0	0.1	1.1	0.9	0.008	1.1	0.1	0.3	0.05
19	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
20	1	7	7	0.7	4.2	0.1	0.0	6.9	4.8	0.055	6.9	0.8	4.5	0.36
21	1	7	8	0.5	3.0	0.2	0.5	8.3	4.9	0.047	8.3	0.5	3.3	0.35
22	1	7	9	0.2	1.1	0.4	0.8	9.4	5.8	0.035	9.4	0.3	1.3	0.20
23	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
24	1	7	6	0.4	2.6	0.2	0.4	6.2	3.9	0.038	6.2	0.5	2.8	0.19
25	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
26	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
27	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
28	1	7	10	0.3	1.5	0.5	0.8	10.4	6.3	0.038	10.4	0.3	1.7	0.25
29	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
30	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
31	1	6	15	0.4	1.8	0.6	1.1	15.4	10.2	0.060	15.4	0.5	2.1	0.35
32	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
33	1	13	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
34	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
35	1	10	3	0.5	3.3	0.3	0.3	3.0	2.3	0.033	3.0	0.5	3.2	0.06
36	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
37	1	7	1	0.1	0.3	0.0	0.1	1.1	0.7	0.006	1.1	0.1	0.3	0.04
38	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
39	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
40	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
41	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
42	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
43	1	9	1	0.2	1.2	0.0	0.1	1.1	0.8	0.013	1.1	0.2	1.2	0.04
44	1	8	1	0.1	0.5	0.0	0.2	1.2	0.9	0.010	1.2	0.1	0.6	0.07
45	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
46	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
47	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
101	PEP		212	10.8	58.0	8	15	219	146	1.154	219	11.7	64.2	6.2

Tableau 7.12 Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence PRU

			CONDITIONS INIT.			DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
2	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
3	1	7	9	0.6	4.4	0.6	0.0	8.4	6.0	0.056	8.4	0.6	4.7	0.33
4	1	8	11	0.2	0.8	1.0	0.7	10.7	8.5	0.039	10.7	0.2	1.1	0.23
5	1	8	12	0.3	1.9	1.2	0.0	10.8	10.3	0.057	10.8	0.4	2.2	0.31
6	1	8	4	0.3	1.8	0.3	0.5	4.2	3.1	0.028	4.2	0.3	1.9	0.12
7	1	8	1	0.3	2.9	0.1	0.0	0.9	0.9	0.021	0.9	0.3	2.9	0.01
8	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
9	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
10	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
11	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
12	1	12	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
13	1	8	5	1.2	10.8	0.4	0.1	4.7	3.1	0.078	4.7	1.2	10.9	0.10
14	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
15	1	7	1	0.3	2.7	0.1	0.0	0.9	0.8	0.016	0.9	0.3	2.8	0.03
16	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
17	1	7	2	0.1	0.8	0.1	0.2	2.1	1.3	0.011	2.1	0.1	0.9	0.06
18	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
19	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
20	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
21	1	7	5	0.9	7.3	0.3	0.0	4.7	4.1	0.070	4.7	0.9	7.6	0.35
22	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
23	1	7	1	0.1	0.6	0.1	0.0	0.9	0.7	0.007	0.9	0.1	0.6	0.04
24	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
25	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
26	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
27	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
28	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
29	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
30	1	7	5	1.0	9.7	0.3	0.0	4.7	3.9	0.081	4.7	1.1	9.7	0.03
31	1	6	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
32	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
33	1	13	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
34	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
35	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
36	1	10	4	0.2	1.8	0.5	0.8	4.3	2.7	0.026	4.3	0.2	1.9	0.16
37	1	7	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
38	1	7	1	0.2	1.1	0.1	0.0	0.9	0.7	0.010	0.9	0.2	1.1	0.02
39	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
40	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
41	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
42	1	7	1	0.1	0.7	0.1	0.0	0.9	0.7	0.008	0.9	0.1	0.8	0.04
43	1	9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
44	1	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
45	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
46	1	10	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
47	1	11	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.00
101	PEP		62	5.9	47.4	5	3	60	47	0.510	60	6.0	49.2	1.8

Tableau 7.13 Résultats des projections de tables de peuplement par placette pour l'essence TOT

			CONDITIONS INIT.			DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
1	1	7	20	0.7	3.7	1.5	2.8	21.2	17.6	0.130	21.2	0.8	4.5	0.82
2	1	8	24	0.5	2.2	1.5	3.8	26.2	22.3	0.150	26.2	0.6	3.3	1.08
3	1	7	19	1.1	8.0	1.2	2.4	20.2	13.7	0.113	20.2	1.2	8.6	0.63
4	1	8	34	1.2	7.2	2.4	2.2	33.8	24.3	0.158	33.8	1.3	8.2	0.98
5	1	8	37	1.3	7.4	3.4	1.5	35.1	28.9	0.186	35.1	1.3	8.2	0.83
6	1	8	27	1.3	8.8	2.3	2.2	26.9	19.8	0.148	26.9	1.4	9.0	0.22
7	1	8	23	1.2	9.3	1.5	1.8	23.3	18.9	0.153	23.3	1.3	10.3	0.93
8	1	8	12	0.3	1.5	0.9	3.4	14.5	11.1	0.106	14.5	0.4	2.4	0.82
9	1	11	24	0.7	3.2	2.8	3.8	25.0	21.0	0.190	25.0	0.8	4.3	1.09
10	1	7	13	0.6	3.1	1.1	2.6	14.6	11.3	0.095	14.6	0.6	3.5	0.41
11	1	7	38	0.7	2.9	2.6	2.5	37.9	32.3	0.164	37.9	0.9	3.8	0.90
12	1	12	27	0.9	5.8	4.1	4.4	27.3	22.3	0.192	27.3	1.0	6.2	0.34
13	1	8	10	1.6	14.1	0.8	1.9	11.1	6.3	0.109	11.1	1.6	14.3	0.14
14	1	8	9	0.5	3.0	0.9	2.5	10.6	7.7	0.084	10.6	0.5	3.3	0.31
15	1	7	23	1.0	6.4	1.1	2.4	24.2	17.0	0.114	24.2	1.0	7.2	0.78
16	1	7	36	1.1	5.6	2.1	2.5	36.4	24.7	0.150	36.4	1.2	6.3	0.65
17	1	7	29	1.3	6.6	1.3	2.3	30.0	18.2	0.135	30.0	1.4	7.4	0.82
18	1	8	25	0.8	4.5	2.1	2.2	25.1	22.4	0.146	25.1	0.9	5.3	0.73
19	1	7	18	0.6	3.6	1.3	3.1	19.8	15.4	0.096	19.8	0.7	3.9	0.28
20	1	7	38	1.8	9.6	2.2	0.5	36.3	20.7	0.156	36.3	1.8	10.4	0.84
21	1	7	18	1.8	13.2	0.8	1.4	18.6	12.2	0.148	18.6	1.9	14.1	0.90
22	1	7	20	0.7	4.0	1.3	3.0	21.7	14.5	0.094	21.7	0.8	4.5	0.51
23	1	7	35	1.2	7.4	2.5	2.2	34.7	22.7	0.138	34.7	1.2	8.0	0.59
24	1	7	24	1.2	7.3	1.7	1.6	23.8	15.4	0.112	23.8	1.2	7.2	-0.06
25	1	10	42	0.8	3.7	5.1	6.8	43.7	34.8	0.214	43.7	1.0	4.9	1.24
26	1	7	54	1.2	6.4	3.9	1.7	51.8	39.5	0.213	51.8	1.4	7.6	1.20
27	1	7	7	0.3	1.6	0.5	2.5	9.1	6.5	0.065	9.1	0.4	2.0	0.40
28	1	7	28	0.8	4.6	1.3	2.7	29.4	20.8	0.130	29.4	1.0	5.5	0.93
29	1	7	20	0.7	4.5	0.7	3.1	22.4	17.3	0.121	22.4	0.9	5.5	0.97
30	1	7	14	2.0	18.5	1.0	1.3	14.3	8.9	0.129	14.3	1.9	17.2	-1.37
31	1	6	37	0.8	3.2	2.0	3.4	38.4	25.2	0.132	38.4	0.9	4.0	0.82
32	1	10	36	1.2	6.8	4.0	2.8	34.8	26.9	0.193	34.8	1.3	7.9	1.17
33	1	13	37	0.8	3.9	5.6	8.2	39.6	31.4	0.257	39.6	1.0	5.4	1.52
34	1	7	21	0.9	6.0	1.8	2.1	21.3	15.1	0.101	21.3	0.9	5.9	-0.12
35	1	10	14	0.9	5.5	1.0	3.8	16.7	12.6	0.134	16.7	1.0	6.3	0.80
36	1	10	15	1.2	10.5	2.0	1.7	14.7	11.0	0.160	14.7	1.2	10.9	0.40
37	1	7	17	0.8	4.8	1.4	2.2	17.8	12.3	0.089	17.8	0.8	5.0	0.15
38	1	7	25	0.9	5.7	2.0	2.9	25.9	18.3	0.122	25.9	1.0	6.0	0.38
39	1	10	10	0.5	3.3	1.3	3.5	12.3	8.7	0.110	12.3	0.5	3.8	0.52
40	1	8	26	0.9	5.5	2.4	2.8	26.4	20.8	0.141	26.4	1.0	6.3	0.77
41	1	11	13	1.1	6.6	2.3	2.3	13.0	10.4	0.129	13.0	1.0	6.2	-0.41
42	1	7	28	1.0	6.9	2.6	4.1	29.6	18.7	0.116	29.6	1.0	7.4	0.45
43	1	9	32	1.6	11.0	3.6	2.4	30.7	18.9	0.132	30.7	1.5	9.9	-1.12
44	1	8	18	0.9	6.4	1.5	2.5	19.0	16.1	0.133	19.0	1.0	7.2	0.77
45	1	10	17	0.5	2.9	1.6	4.0	19.5	15.4	0.156	19.5	0.7	4.0	1.13
46	1	10	29	0.8	4.3	3.9	5.1	30.2	24.7	0.190	30.2	1.0	5.1	0.74
47	1	11	15	0.9	5.1	2.0	3.7	16.7	13.0	0.160	16.7	0.8	4.6	-0.50
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	N. MORT	N. REC.	N. SURV.	TIG. PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM m*2	VMB m*3	ACCR VMB
101	PEP		2443	88.2	528.9	219	336	2560	1853	14.151	2560	96.3	587.3	58.3

Tableau 7.14 Résultats des projections des tables de peuplement par essence et pour l'ensemble des placettes

ESS	ÉTAT	VALEURS INITIALES			DYNAMIQUE DES TIGES			VALEURS FINALES		
		N. TIGES (1)	STM m*2 (2)	VMB m*3 (3)	N. MORTS (4)	N. RECRUS (5)	ACCR. SURV. (6)	N. TIGES (7)	STM m*2 (8)	VMB m*3 (9)
BOJ	OBSERVÉ	671	36.25	237.15	44.0	59.0	5.150	685.0	37.24	248.75
BOJ	PRÉDIT	671	36.30	237.45	44.9	60.5	5.013	686.6	37.82	250.43
BOP	OBSERVÉ	168	4.20	23.03	10.0	41.0	0.879	199.0	4.96	27.51
BOP	PRÉDIT	168	4.26	23.36	11.0	41.0	0.918	198.1	5.11	28.31
ERS	OBSERVÉ	80	2.62	16.26	3.0	17.0	0.501	95.0	3.17	20.11
ERS	PRÉDIT	80	2.66	16.53	3.0	17.4	0.491	94.4	3.18	19.95
ERR	OBSERVÉ	126	2.82	13.66	16.0	27.0	0.620	137.0	3.17	15.36
ERR	PRÉDIT	126	2.84	13.76	17.2	24.0	0.657	132.8	3.19	15.88
PRP	OBSERVÉ	25	0.32	1.16	3.0	21.0	0.109	43.0	0.59	2.33
PRP	PRÉDIT	25	0.33	1.19	3.4	18.0	0.123	39.7	0.56	2.16
SAB	OBSERVÉ	920	18.09	91.21	116.0	141.0	4.185	945.0	20.85	110.46
SAB	PRÉDIT	920	18.24	88.47	115.2	144.7	4.032	949.5	20.79	105.79
EPB	OBSERVÉ	120	5.25	34.37	7.0	7.0	0.867	120.0	6.02	40.58
EPB	PRÉDIT	120	5.26	33.41	7.1	6.9	0.894	119.8	5.94	39.15
EPR	OBSERVÉ	59	1.61	9.54	4.0	6.0	0.380	61.0	2.01	12.80
EPR	PRÉDIT	59	1.63	9.32	4.5	5.9	0.359	60.4	1.97	12.24
THO	OBSERVÉ	212	10.83	58.23	7.0	15.0	1.158	220.0	11.73	63.80
THO	PRÉDIT	212	10.79	58.00	7.9	15.3	1.154	219.4	11.69	64.18
PRU	OBSERVÉ	62	6.04	48.30	5.0	3.0	0.464	60.0	5.79	46.75
PRU	PRÉDIT	62	5.89	47.42	5.1	2.7	0.510	59.6	6.01	49.18
TOT	OBSERVÉ	2443	88.04	532.91	215.0	337.0	14.314	2565.0	95.54	588.45
TOT	PRÉDIT	2443	88.20	528.91	219.1	336.5	14.151	2560.4	96.27	587.25

Tableau 7.15 Validation du système de prédiction pour le phénomène de la mortalité pour l'essence BOJ

NOPL	MORTALITÉ PAR PLACETTE		ÉCART ALGÈBRE	ÉCART RELATIF EN POURCENTAGE	ÉCART AU CARRÉ
	PRÉDIT	OBSERVÉ			
1	0.4696	0	0.4696	100.0000	0.2205
2	0.8013	0	0.8013	100.0000	0.6420
3	0.2293	1	-0.7707	-77.0654	0.5939
4	0.4968	0	0.4968	100.0000	0.2468
5	0.3887	2	-1.6113	-80.5646	2.5963
6	0.6081	0	0.6081	100.0000	0.3697
7	0.6922	3	-2.3078	-76.9262	5.3259
8	0.3394	0	0.3394	100.0000	0.1152
9	0.3716	0	0.3716	100.0000	0.1381
10	0.1839	0	0.1839	100.0000	0.0338
11	1.0908	0	1.0908	100.0000	1.1899
12	0.4650	0	0.4650	100.0000	0.2162
13	0.2918	0	0.2918	100.0000	0.0852
14	0.1706	0	0.1706	100.0000	0.0291
15	0.8403	1	-0.1597	-15.9677	0.0255
16	0.6313	0	0.6313	100.0000	0.3985
17	0.2789	0	0.2789	100.0000	0.0778
18	0.8569	0	0.8569	100.0000	0.7343
19	0.2163	0	0.2163	100.0000	0.0468
20	0.6205	2	-1.3795	-68.9759	1.9031
21	0.2781	0	0.2781	100.0000	0.0773
22	0.2023	0	0.2023	100.0000	0.0409
23	0.7253	1	-0.2747	-27.4717	0.0755
24	0.6107	0	0.6107	100.0000	0.3730
25	0.3972	0	0.3972	100.0000	0.1578
26	0.6707	3	-2.3293	-77.6435	5.4257
27	0.1051	0	0.1051	100.0000	0.0110
28	0.5280	0	0.5280	100.0000	0.2788
29	0.3182	0	0.3182	100.0000	0.1013
30	0.3871	1	-0.6129	-61.2910	0.3757
31	0.3294	0	0.3294	100.0000	0.1085
32	0.4941	1	-0.5059	-50.5928	0.2560
33	0.4722	0	0.4722	100.0000	0.2230
34	0.4219	1	-0.5781	-57.8067	0.3342
35	0.4644	0	0.4644	100.0000	0.2157
36	0.7366	0	0.7366	100.0000	0.5425
37	0.3034	0	0.3034	100.0000	0.0920
38	0.3152	0	0.3152	100.0000	0.0993
39	0.2175	1	-0.7825	-78.2521	0.6123
40	0.6452	1	-0.3548	-35.4767	0.1259
41	1.0100	1	0.0100	1.0029	0.0001
42	0.3917	1	-0.6083	-60.8333	0.3701
43	0.9595	1	-0.0405	-4.0456	0.0016
44	0.2935	0	0.2935	100.0000	0.0861
45	0.4047	0	0.4047	100.0000	0.1638
46	0.4294	1	-0.5706	-57.0581	0.3256
47	1.0554	2	-0.9446	-47.2289	0.8922
48	0.5501	0	0.5501	100.0000	0.3026
49	0.4788	0	0.4788	100.0000	0.2293
50	0.7730	0	0.7730	100.0000	0.5975
...					
101 PEP	44.9185	44	0.9185	2.0875	50.5885
Coefficient du pouvoir explicatif du modèle (R ²) =					0.1099

Tableau 7.16 Validation du système de prédiction pour le phénomène du recrutement pour l'essence BOJ

NOPL	RECRUTEMENT PAR PLACETTE		ÉCART ALGÈBRE	ÉCART RELATIF EN POURCENTAGE	ÉCART AU CARRÉ
	PRÉDIT	OBSERVÉ			
1	0.7545	2	-1.2455	-62.2754	1.5513
2	1.3574	3	-1.6426	-54.7521	2.6980
3	0.0204	0	0.0204	100.0000	0.0004
4	0.1217	0	0.1217	100.0000	0.0148
5	0.0000	1	-1.0000	-100.0000	1.0000
6	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.2944	0	0.2944	100.0000	0.0866
8	1.1825	1	0.1825	18.2481	0.0333
9	1.1327	0	1.1327	100.0000	1.2830
10	0.8193	0	0.8193	100.0000	0.6712
11	1.0015	4	-2.9985	-74.9621	8.9909
12	0.8603	0	0.8603	100.0000	0.7402
13	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.8599	1	-0.1401	-14.0137	0.0196
15	0.6418	0	0.6418	100.0000	0.4119
16	0.4773	0	0.4773	100.0000	0.2278
17	0.1220	0	0.1220	100.0000	0.0149
18	0.8768	3	-2.1232	-70.7722	4.5078
19	0.6976	0	0.6976	100.0000	0.4866
20	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
21	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
22	0.8859	3	-2.1141	-70.4695	4.4694
23	0.2323	1	-0.7677	-76.7749	0.5894
24	0.3060	1	-0.6940	-69.3998	0.4816
25	0.8050	0	0.8050	100.0000	0.6480
26	0.3278	0	0.3278	100.0000	0.1075
27	0.8947	1	-0.1053	-10.5263	0.0111
28	0.7126	0	0.7126	100.0000	0.5078
29	0.7255	0	0.7255	100.0000	0.5263
30	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
31	0.7662	1	-0.2338	-23.3824	0.0547
32	0.2213	0	0.2213	100.0000	0.0490
33	1.1149	0	1.1149	100.0000	1.2431
34	0.0962	0	0.0962	100.0000	0.0093
35	0.9134	0	0.9134	100.0000	0.8343
36	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
37	0.1475	0	0.1475	100.0000	0.0218
38	0.2556	0	0.2556	100.0000	0.0653
39	0.9327	0	0.9327	100.0000	0.8699
40	0.5451	0	0.5451	100.0000	0.2971
41	0.0000	2	-2.0000	-100.0000	4.0000
42	0.1428	1	-0.8572	-85.7159	0.7347
43	0.0000	0	0.0000	0.0000	0.0000
44	0.5800	0	0.5800	100.0000	0.3365
45	1.5314	3	-1.4686	-48.9546	2.1569
46	0.6576	1	-0.3424	-34.2411	0.1172
47	0.5689	0	0.5689	100.0000	0.3236
48	0.1981	0	0.1981	100.0000	0.0393
49	0.6995	1	-0.3005	-30.0546	0.0903
50	0.9008	0	0.9008	100.0000	0.8115
...					
101 PEP	60.5377	59	1.5377	2.6062	97.8870
Coefficient du pouvoir explicatif du modèle				(R*2) =	0.1454

Tableau 7.17 Validation du système de prédiction pour le phénomène de l'accroissement en surface terrière pour l'essence BOJ

NOPL	ACCROISSEMENT EN SURFACE TERRIERE PRÉDIT	OBSERVÉ	ÉCART ALGÈBRIQUE	ÉCART RELATIF EN POURCENTAGE	ÉCART AU CARRÉ
1	0.0725	0.0727	-0.0002	-0.2286	0.0000
2	0.0629	0.0513	0.0116	22.5290	0.0001
3	0.0258	0.0132	0.0126	95.9286	0.0002
4	0.0591	0.0758	-0.0167	-22.0166	0.0003
5	0.0377	0.0150	0.0226	100.0000	0.0005
6	0.0379	0.0380	-0.0001	-0.2689	0.0000
7	0.0642	0.0525	0.0117	22.2489	0.0001
8	0.0750	0.0594	0.0155	26.1487	0.0002
9	0.0697	0.0756	-0.0059	-7.7811	0.0000
10	0.0359	0.0382	-0.0023	-6.0209	0.0000
11	0.0860	0.0728	0.0132	18.0895	0.0002
12	0.0746	0.0658	0.0089	13.4600	0.0001
13	0.0245	0.0086	0.0159	100.0000	0.0003
14	0.0332	0.0295	0.0037	12.5400	0.0000
15	0.0805	0.0530	0.0275	51.8166	0.0008
16	0.0327	0.0341	-0.0014	-4.1008	0.0000
17	0.0310	0.0363	-0.0053	-14.4897	0.0000
18	0.0762	0.0740	0.0022	2.9086	0.0000
19	0.0326	0.0622	-0.0297	-47.6795	0.0009
20	0.0473	0.0593	-0.0119	-20.1652	0.0001
21	0.0312	0.0214	0.0098	45.6746	0.0001
22	0.0184	0.0368	-0.0184	-50.0145	0.0003
23	0.0612	0.0436	0.0176	40.3103	0.0003
24	0.0327	0.0553	-0.0226	-40.8026	0.0005
25	0.0701	0.0744	-0.0043	-5.7857	0.0000
26	0.0569	0.0578	-0.0009	-1.5867	0.0000
27	0.0295	0.0218	0.0076	34.8914	0.0001
28	0.0574	0.0380	0.0194	51.2247	0.0004
29	0.0481	0.0257	0.0224	87.1806	0.0005
30	0.0073	0.0070	0.0003	4.1060	0.0000
31	0.0346	0.0218	0.0128	58.4776	0.0002
32	0.0613	0.0752	-0.0139	-18.4996	0.0002
33	0.0806	0.0872	-0.0065	-7.5042	0.0000
34	0.0313	0.0396	-0.0083	-21.0300	0.0001
35	0.0812	0.0736	0.0076	10.3873	0.0001
36	0.0653	0.0850	-0.0198	-23.2472	0.0004
37	0.0310	0.0194	0.0117	60.2054	0.0001
38	0.0281	0.0330	-0.0049	-14.8628	0.0000
39	0.0509	0.0366	0.0143	39.2135	0.0002
40	0.0820	0.0997	-0.0177	-17.7490	0.0003
41	0.0810	0.1034	-0.0225	-21.7104	0.0005
42	0.0432	0.0421	0.0011	2.6015	0.0000
43	0.0554	0.0563	-0.0009	-1.6452	0.0000
44	0.0422	0.0606	-0.0185	-30.4899	0.0003
45	0.0444	0.0566	-0.0122	-21.5312	0.0001
46	0.0493	0.0529	-0.0036	-6.8401	0.0000
47	0.0813	0.0449	0.0364	80.9831	0.0013
48	0.0660	0.0609	0.0051	8.3763	0.0000
49	0.0643	0.0665	-0.0022	-3.2646	0.0000
50	0.0866	0.0713	0.0153	21.4788	0.0002
...					
101 PEP	5.0130	5.1501	-0.1371	-2.6627	0.0290
Coefficient du pouvoir explicatif du modèle (R ²)				=	0.5723

Tableau 7.18 Validation du système de prédiction pour le phénomène de la mortalité par essence

ESSENCE	MORTALITÉ PAR PLACETTE		ÉCART ALGÈBRIQUE MOYEN	ÉCART REL. MOYEN EN POURCENTAGE	R*2
	PRÉDIT	OBSERVÉ			
BOJ	44.9185	44.0000	0.9185	2.0875	0.1099
BOP	10.9509	10.0000	0.9509	9.5095	0.4446
ERS	2.9757	3.0000	-0.0243	-0.8097	0.1984
ERR	17.1625	16.0000	1.1625	7.2656	0.0674
PRP	3.3546	3.0000	0.3546	11.8205	0.5729
SAB	115.2096	116.0000	-0.7904	-0.6814	0.1793
EPB	7.1029	7.0000	0.1029	1.4697	0.2247
EPR	4.5116	4.0000	0.5116	12.7898	0.5884
THO	7.8592	7.0000	0.8592	12.2748	0.2575
PRU	5.0813	5.0000	0.0813	1.6266	0.3569
TOT	219.1269	215.0000	4.1269	1.9195	0.1544

Tableau 7.19 Validation du système de prédiction pour le phénomène du recrutement par essence

ESSENCE	RECRUTEMENT PAR PLACETTE		ÉCART ALGÈBRIQUE MOYEN	ÉCART REL. MOYEN EN POURCENTAGE	R*2
	PRÉDIT	OBSERVÉ			
BOJ	60.5377	59.0000	1.5377	2.6062	0.1454
BOP	41.0302	41.0000	0.0302	0.0736	0.0759
ERS	17.3873	17.0000	0.3873	2.2785	0.1304
ERR	24.0076	27.0000	-2.9924	-11.0830	0.4384
PRP	18.0358	21.0000	-2.9642	-14.1152	0.4415
SAB	144.7020	141.0000	3.7020	2.6255	0.2667
EPB	6.9111	7.0000	-0.0889	-1.2695	0.1198
EPR	5.9179	6.0000	-0.0821	-1.3676	0.2813
THO	15.2609	15.0000	0.2609	1.7396	0.3494
PRU	2.6988	3.0000	-0.3012	-10.0412	0.6417
TOT	336.4894	337.0000	-0.5106	-0.1515	0.1672

Tableau 7.20 Validation du système de prédiction pour le phénomène de l'accroissement en surface terrière par essence

ESSENCE	ACCROISSEMENT EN SURFACE TERRIÈRE		ÉCART ALGÈBRIQUE MOYEN	ÉCART REL. MOYEN EN POURCENTAGE	R*2
	PRÉDIT	OBSERVÉ			
BOJ	5.0130	5.1501	-0.1371	-2.6627	0.5723
BOP	0.9180	0.8788	0.0392	4.4554	0.6311
ERS	0.4912	0.5013	-0.0101	-2.0224	0.5528
ERR	0.6566	0.6199	0.0367	5.9196	0.3671
PRP	0.1230	0.1094	0.0135	12.3522	0.7560
SAB	4.0323	4.1855	-0.1532	-3.6605	0.6787
EPB	0.8938	0.8673	0.0265	3.0513	0.6902
EPR	0.3589	0.3800	-0.0211	-5.5513	0.8087
THO	1.1545	1.1583	-0.0038	-0.3318	0.7686
PRU	0.5100	0.4637	0.0464	9.9973	0.8430
TOT	14.1513	14.3145	-0.1632	-1.1403	0.5743

Tableau 7.21 Résultats de la projection d'une table de peuplement pour l'essence BOJ et pour la placette numéro 11

			CONDITIONS INIT.			DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
CL	IT	AN-	N.	STM	VMB	MORT	REC.	SURV.	TIGES	ACCR.	N.	STM	VMB	ACCR
DHP	NÉES		TIG.	m*2	m*3				PR.	SURV.	TIG.	m*2	m*3	VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
10	2	14	1.74	0.01	0.03	0.10	0.85	2.49	0.00	-0.01	1.18	0.01	0.02	-0.01
12	2	14	6.88	0.08	0.22	0.36	0.00	6.52	1.31	-0.05	2.10	0.02	0.07	-0.16
14	2	14	3.70	0.06	0.19	0.18	0.00	3.53	5.73	0.04	5.97	0.09	0.31	0.12
16	2	14	5.56	0.11	0.41	0.25	0.00	5.31	3.28	-0.04	3.49	0.07	0.26	-0.15
18	2	14	1.06	0.03	0.11	0.04	0.00	1.01	5.11	0.10	5.13	0.13	0.52	0.41
20	2	14	0.95	0.03	0.12	0.04	0.00	0.91	0.99	0.00	1.01	0.03	0.13	0.01
22	2	14	0.07	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.89	0.03	0.89	0.03	0.15	0.14
24	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.06	0.00	0.01	0.01
26	2	14	0.90	0.05	0.22	0.04	0.00	0.86	0.00	-0.04	0.04	0.00	0.01	-0.22
28	2	14	0.06	0.00	0.02	0.00	0.00	0.06	0.83	0.05	0.83	0.05	0.25	0.23
30	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.05	0.00	0.02	0.02
32	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
38	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
44	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
46	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
48	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
52	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
54	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
56	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
58	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
62	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
64	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
66	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
68	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
72	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
74	2	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL			120.91	0.37	1.34	1.01	0.85	20.75	18.25	0.09	20.75	0.45	1.74	0.40

Les tableaux 7.22 à 7.25 illustrent les prédictions sur une période de 140 ans pour le bouleau jaune, le bouleau à papier, le sapin baumier et pour l'ensemble du peuplement (TOT) de la placette n° 11. Nous ne prétendons pas qu'elles sont exactes et précises, nous espérons qu'elles soient plausibles. Ces prédictions sont illustrées uniquement par curiosité puisque nous ne disposons d'aucune série de croissance pour les valider. Seuls des sylviculteurs d'expérience peuvent témoigner du réalisme de telles prédictions. Nous pouvons tout de même constater, pour l'ensemble du peuplement, que les volumes prédits augmentent au cours des 50 premières années de croissance, puis plafonnent et diminuent ensuite. Après 140 ans de

croissance, on retrouve pratiquement le même volume prédit qu'à la troisième itération, soit 6 m^3 pour la placette de 0,04 hectare, ce qui équivaut à $150 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Nous illustrons, sur les figures 7.1 à 7.4, les volumes prédits et cumulés au cours des 20 itérations pour chacune des essences présentes dans quatre placettes possédant pourtant des structures très différentes. On trouve également la sommation des volumes pour toutes les essences confondues sous l'acronyme « TOT ». À la figure 7.2, l'acronyme « PTH » réfère aux volumes marchands bruts (VMB) publiés par Plonski en 1981 pour les feuillus d'ombre avec un indice de qualité de station (IQS) de 15,2 m à 50 ans.

Tableau 7.22 Résultats des projections des tables de peuplement selon les placettes pour l'essence BOJ et pour la placette numéro 11

			CONDITIONS INIT.			DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM M*2	VMB M*3	MORT	REC.	SURV.	TIGES PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM M*2	VMB M*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
11	1	7	21.0	0.3	1.0	1.1	1.0	20.9	19.1	0.086	20.9	0.4	1.3	0.38
11	2	14	20.9	0.4	1.3	1.0	0.9	20.8	18.3	0.090	20.8	0.5	1.7	0.40
11	3	21	20.8	0.5	1.7	1.0	0.7	20.5	17.1	0.093	20.5	0.5	2.1	0.41
11	4	28	20.5	0.5	2.1	0.9	0.5	20.1	16.0	0.094	20.1	0.6	2.6	0.40
11	5	35	20.1	0.6	2.6	0.9	0.4	19.6	15.0	0.095	19.6	0.7	2.9	0.40
11	6	42	19.6	0.7	2.9	0.8	0.2	19.0	14.1	0.096	19.0	0.7	3.3	0.39
11	7	49	19.0	0.7	3.3	0.8	0.1	18.2	13.3	0.096	18.2	0.8	3.7	0.37
11	8	56	18.2	0.8	3.7	0.8	0.0	17.4	12.6	0.096	17.4	0.9	4.1	0.36
11	9	63	17.4	0.9	4.1	0.8	0.0	16.7	11.9	0.096	16.7	0.9	4.4	0.34
11	10	70	16.7	0.9	4.4	0.8	0.0	15.9	11.3	0.096	15.9	1.0	4.7	0.32
11	11	77	15.9	1.0	4.7	0.8	0.0	15.1	10.8	0.096	15.1	1.0	5.0	0.29
11	12	84	15.1	1.0	5.0	0.8	0.0	14.4	10.2	0.095	14.4	1.1	5.3	0.26
11	13	91	14.4	1.1	5.3	0.8	0.0	13.6	9.7	0.094	13.6	1.1	5.5	0.22
11	14	98	13.6	1.1	5.5	0.8	0.0	12.9	9.1	0.092	12.9	1.1	5.7	0.18
11	15	105	12.9	1.1	5.7	0.8	0.0	12.1	8.4	0.089	12.1	1.1	5.8	0.13
11	16	112	12.1	1.1	5.8	0.8	0.0	11.3	7.6	0.083	11.3	1.1	5.9	0.06
11	17	119	11.3	1.1	5.9	0.8	0.0	10.5	6.9	0.078	10.5	1.1	5.9	0.01
11	18	126	10.5	1.1	5.9	0.8	0.0	9.8	6.3	0.074	9.8	1.1	5.8	-0.05
11	19	133	9.8	1.1	5.8	0.8	0.0	9.0	5.8	0.070	9.0	1.1	5.7	-0.10
11	20	140	9.0	1.1	5.7	0.8	0.0	8.2	5.3	0.066	8.2	1.1	5.6	-0.14

Tableau 7.23 Résultats des projections des tables de peuplement selon les placettes pour l'essence BOP et pour la placette numéro 11

			CONDITIONS INIT.			DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM M*2	VMB M*3	MORT	REC.	SURV.	TIGES PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM M*2	VMB M*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
11	1	7	6.0	0.2	1.0	0.3	0.7	6.4	5.1	0.032	6.4	0.2	1.1	0.15
11	2	14	6.4	0.2	1.1	0.3	0.6	6.7	5.4	0.035	6.7	0.3	1.3	0.15
11	3	21	6.7	0.3	1.3	0.3	0.5	6.9	5.6	0.037	6.9	0.3	1.4	0.15
11	4	28	6.9	0.3	1.4	0.3	0.3	6.9	5.7	0.040	6.9	0.3	1.6	0.14
11	5	35	6.9	0.3	1.6	0.3	0.2	6.8	5.7	0.041	6.8	0.3	1.7	0.13
11	6	42	6.8	0.3	1.7	0.3	0.1	6.5	5.5	0.042	6.5	0.4	1.8	0.12
11	7	49	6.5	0.4	1.8	0.3	0.0	6.2	5.3	0.042	6.2	0.4	1.9	0.10
11	8	56	6.2	0.4	1.9	0.3	0.0	5.9	5.0	0.042	5.9	0.4	2.0	0.08
11	9	63	5.9	0.4	2.0	0.4	0.0	5.5	4.7	0.041	5.5	0.4	2.1	0.05
11	10	70	5.5	0.4	2.1	0.4	0.0	5.1	4.3	0.040	5.1	0.4	2.1	0.02
11	11	77	5.1	0.4	2.1	0.4	0.0	4.7	4.0	0.038	4.7	0.4	2.1	-0.01
11	12	84	4.7	0.4	2.1	0.4	0.0	4.3	3.6	0.036	4.3	0.4	2.1	-0.04
11	13	91	4.3	0.4	2.1	0.4	0.0	3.9	3.2	0.033	3.9	0.4	2.0	-0.07
11	14	98	3.9	0.4	2.0	0.4	0.0	3.4	2.8	0.030	3.4	0.4	1.9	-0.11
11	15	105	3.4	0.4	1.9	0.4	0.0	3.0	2.3	0.026	3.0	0.3	1.7	-0.14
11	16	112	3.0	0.3	1.7	0.4	0.0	2.6	1.9	0.022	2.6	0.3	1.6	-0.17
11	17	119	2.6	0.3	1.6	0.4	0.0	2.1	1.5	0.018	2.1	0.3	1.4	-0.18
11	18	126	2.1	0.3	1.4	0.4	0.0	1.8	1.2	0.015	1.8	0.2	1.2	-0.19
11	19	133	1.8	0.2	1.2	0.3	0.0	1.4	0.9	0.012	1.4	0.2	1.0	-0.19
11	20	140	1.4	0.2	1.0	0.3	0.0	1.1	0.7	0.009	1.1	0.2	0.8	-0.18

Tableau 7.24 Résultats des projections des tables de peuplement selon les placettes pour l'essence SAB et pour la placette numéro 11

			CONDITIONS INIT.			DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM M*2	VMB M*3	MORT 	REC.	SURV.	TIGES PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM M*2	VMB M*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
11	1	7	10.0	0.2	0.9	1.1	0.7	9.5	7.3	0.043	9.5	0.2	1.0	0.10
11	2	14	9.5	0.2	1.0	1.1	0.5	8.9	6.7	0.040	8.9	0.2	1.1	0.06
11	3	21	8.9	0.2	1.1	1.1	0.3	8.2	5.9	0.036	8.2	0.2	1.1	0.03
11	4	28	8.2	0.2	1.1	1.0	0.1	7.3	5.2	0.033	7.3	0.2	1.1	0.00
11	5	35	7.3	0.2	1.1	0.9	0.0	6.4	4.5	0.030	6.4	0.2	1.1	-0.02
11	6	42	6.4	0.2	1.1	0.8	0.0	5.6	3.9	0.027	5.6	0.2	1.0	-0.03
11	7	49	5.6	0.2	1.0	0.8	0.0	4.8	3.4	0.024	4.8	0.2	1.0	-0.05
11	8	56	4.8	0.2	1.0	0.7	0.0	4.1	2.9	0.022	4.1	0.2	0.9	-0.06
11	9	63	4.1	0.2	0.9	0.6	0.0	3.5	2.5	0.020	3.5	0.2	0.9	-0.07
11	10	70	3.5	0.2	0.9	0.6	0.0	3.0	2.2	0.017	3.0	0.2	0.8	-0.07
11	11	77	3.0	0.2	0.8	0.5	0.0	2.5	1.8	0.015	2.5	0.1	0.7	-0.08
11	12	84	2.5	0.1	0.7	0.4	0.0	2.0	1.6	0.013	2.0	0.1	0.6	-0.08
11	13	91	2.0	0.1	0.6	0.4	0.0	1.6	1.3	0.012	1.6	0.1	0.6	-0.08
11	14	98	1.6	0.1	0.6	0.3	0.0	1.3	1.0	0.010	1.3	0.1	0.5	-0.08
11	15	105	1.3	0.1	0.5	0.3	0.0	1.0	0.8	0.008	1.0	0.1	0.4	-0.07
11	16	112	1.0	0.1	0.4	0.2	0.0	0.8	0.6	0.006	0.8	0.1	0.3	-0.07
11	17	119	0.8	0.1	0.3	0.2	0.0	0.6	0.5	0.005	0.6	0.1	0.3	-0.06
11	18	126	0.6	0.1	0.3	0.1	0.0	0.5	0.4	0.004	0.5	0.0	0.2	-0.05
11	19	133	0.5	0.0	0.2	0.1	0.0	0.4	0.3	0.003	0.4	0.0	0.2	-0.04
11	20	140	0.4	0.0	0.2	0.1	0.0	0.3	0.2	0.002	0.3	0.0	0.1	-0.04

Tableau 7.25 Résultats des projections des tables de peuplement selon les placettes pour l'essence TOT et pour la placette numéro 11

			CONDITIONS INIT.			DYNAMIQUE DES TIGES					CONDITIONS FINALES			
NO PL.	IT	AN- NÉES	N. TIG.	STM M*2	VMB M*3	MORT 	REC.	SURV.	TIGES PR.	ACCR. SURV.	N. TIG.	STM M*2	VMB M*3	ACCR VMB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
11	1	7	38.0	0.7	2.9	2.6	2.5	37.9	32.3	0.164	37.9	0.9	3.5	0.64
11	2	14	37.9	0.9	3.5	2.5	2.1	37.5	31.3	0.179	37.5	1.0	4.2	0.67
11	3	21	37.5	1.0	4.2	2.4	1.6	36.7	29.6	0.185	36.7	1.1	4.9	0.67
11	4	28	36.7	1.1	4.9	2.3	1.1	35.4	27.9	0.185	35.4	1.2	5.5	0.63
11	5	35	35.4	1.2	5.5	2.2	0.6	33.8	26.0	0.176	33.8	1.3	6.0	0.52
11	6	42	33.8	1.3	6.0	2.1	0.3	32.0	24.2	0.171	32.0	1.4	6.5	0.45
11	7	49	32.0	1.4	6.5	2.0	0.1	30.1	22.6	0.167	30.1	1.5	6.9	0.39
11	8	56	30.1	1.5	6.9	1.9	0.1	28.2	21.1	0.164	28.2	1.5	7.2	0.35
11	9	63	28.2	1.5	7.2	1.9	0.1	26.5	19.6	0.161	26.5	1.5	7.5	0.30
11	10	70	26.5	1.5	7.5	1.8	0.2	24.9	18.3	0.157	24.9	1.6	7.8	0.25
11	11	77	24.9	1.6	7.8	1.8	0.3	23.5	17.0	0.153	23.5	1.6	8.0	0.19
11	12	84	23.5	1.6	8.0	1.7	0.6	22.3	15.8	0.148	22.3	1.6	8.1	0.14
11	13	91	22.3	1.6	8.1	1.7	1.1	21.7	14.7	0.142	21.7	1.6	8.2	0.08
11	14	98	21.7	1.6	8.2	1.8	2.0	21.9	13.5	0.136	21.9	1.6	8.2	0.03
11	15	105	21.9	1.6	8.2	1.9	3.6	23.6	12.5	0.128	23.6	1.6	8.2	-0.02
11	16	112	23.6	1.6	8.2	2.1	3.6	25.0	11.8	0.119	25.0	1.6	8.1	-0.09
11	17	119	25.0	1.6	8.1	2.3	3.6	26.3	11.3	0.113	26.3	1.6	8.0	-0.15
11	18	126	26.3	1.6	8.0	2.5	3.6	27.4	11.1	0.107	27.4	1.6	7.8	-0.18
11	19	133	27.4	1.6	7.8	2.6	3.6	28.4	11.2	0.103	28.4	1.5	7.6	-0.21
11	20	140	28.4	1.5	7.6	2.7	3.6	29.3	11.5	0.101	29.3	1.5	7.4	-0.21

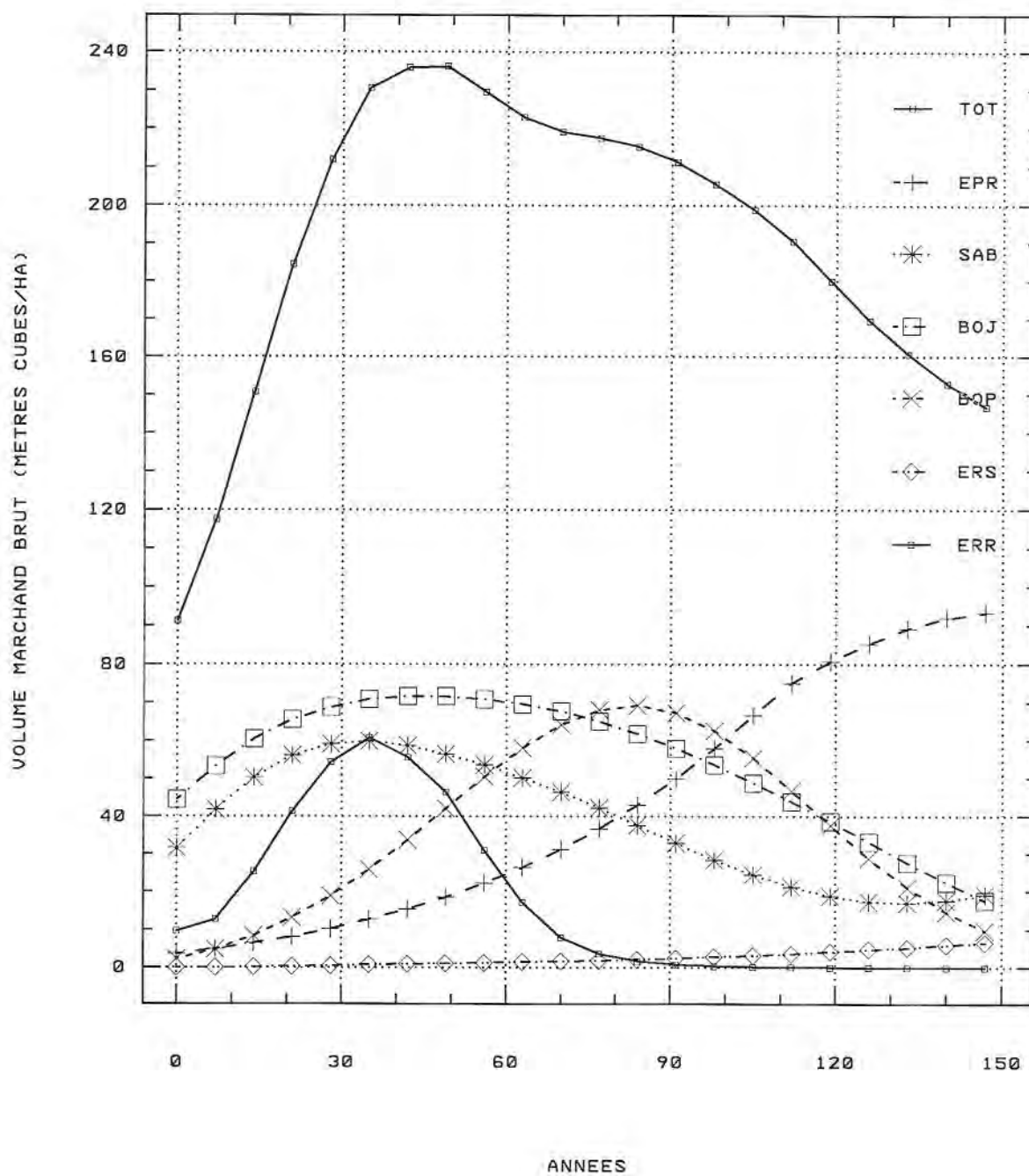


Figure 7.1. Évolution à long terme du volume marchand brut pour la placette n° 25.

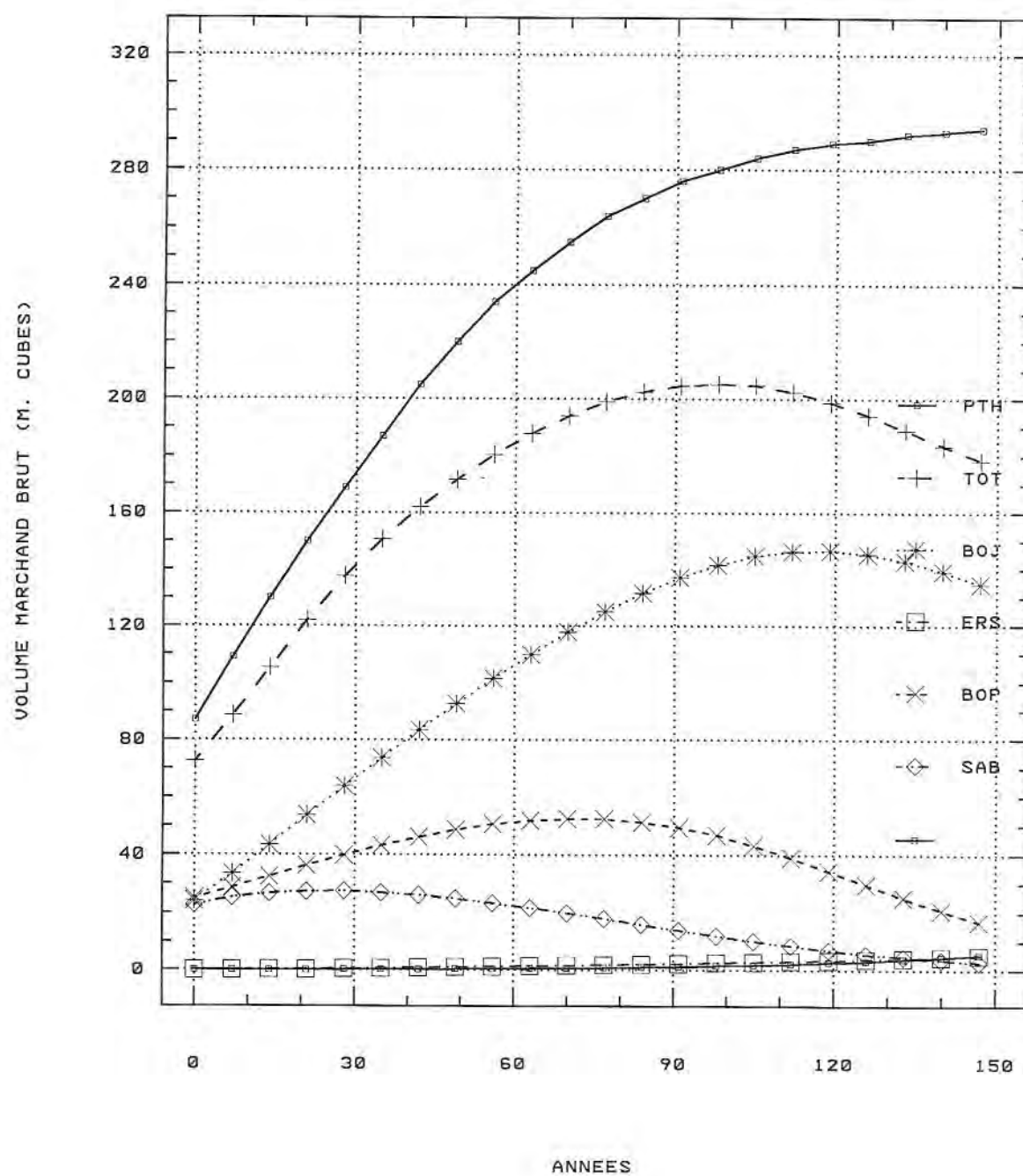


Figure 7.2. Évolution à long terme du volume marchand brut pour la placette n° 11.

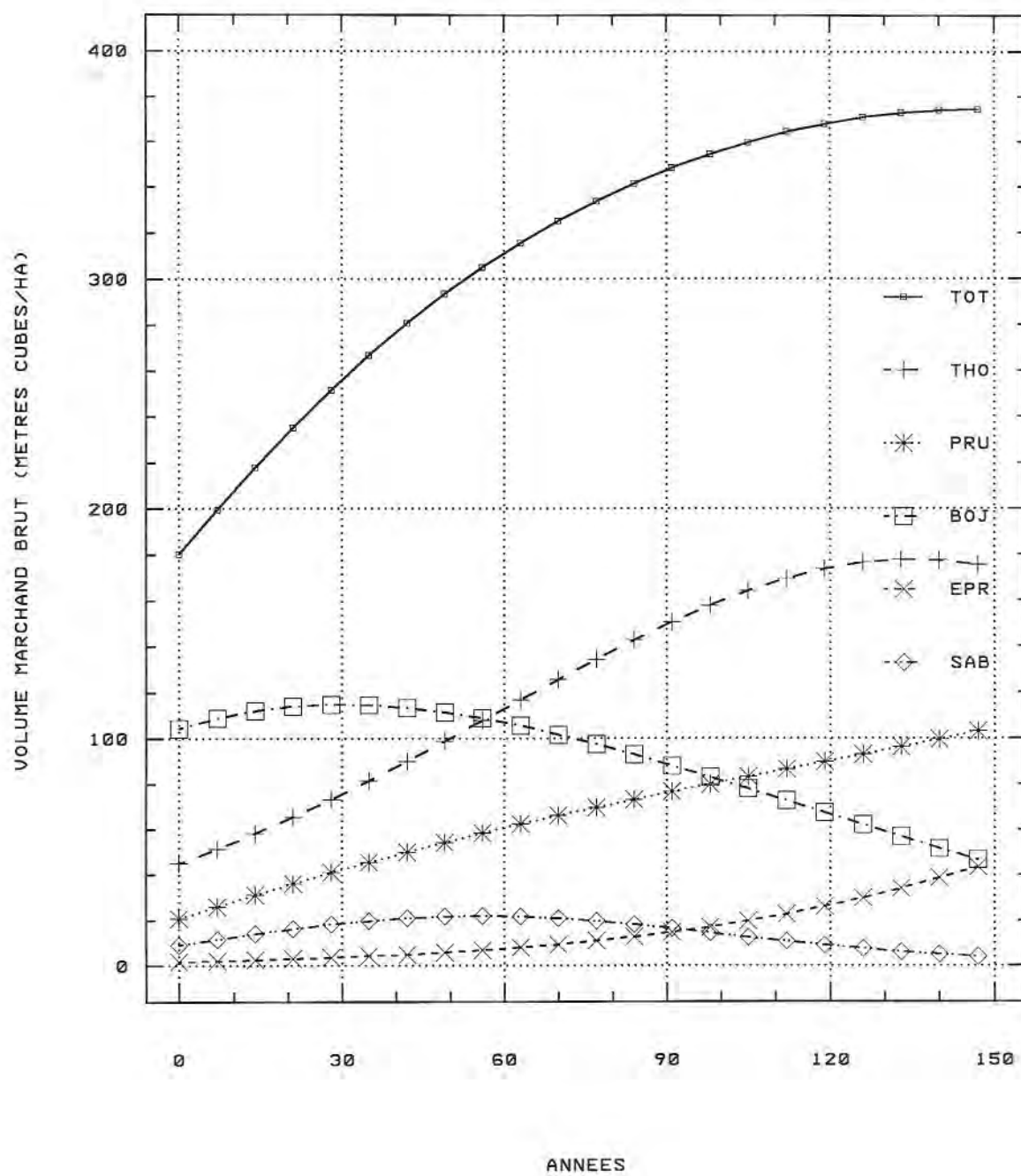


Figure 7.3. Évolution à long terme du volume marchand brut pour la placette n° 4.

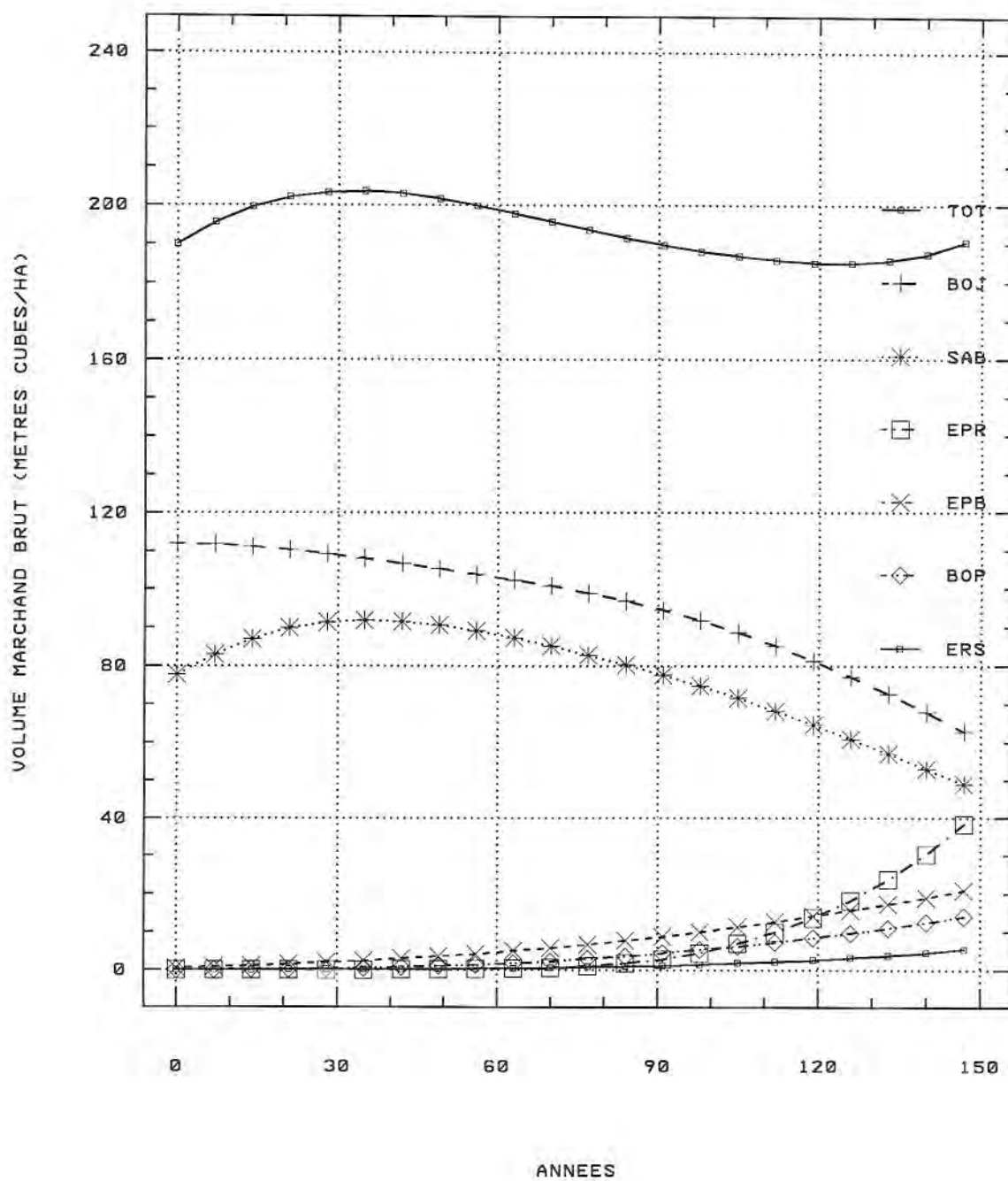


Figure 7.4. Évolution à long terme du volume marchand brut pour la placette n° 100.

NO DE PL.	NOMBRE DE TIGES PAR CLASSE DE DHP																												TOTAL	
	10	14	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54	58	62	66	70	74													
	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72														
1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
2	6	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
4	0	0	0	0	1	3	0	0	2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
5	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
6	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
7	2	0	1	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
8	1	0	0	0	2	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
9	0	0	0	1	0	2	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
10	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
11	8	4	6	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
12	0	0	0	1	0	1	1	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
14	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
15	4	4	0	4	0	2	3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19
16	5	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
17	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
18	3	4	2	0	2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
19	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
20	2	1	0	1	2	0	0	1	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0									

7.3 Matrices des tiges par classe de DHP et par essence

Le simulateur est créé dans le but de prédire la croissance de placettes temporaires dont les tiges sont distribuées par essence et par classe de DHP d'une amplitude de deux centimètres. Ces distributions sont traditionnellement appelées « tables de peuplement ». Ces distributions de tiges par classe de DHP demeurent des estimations parfois biaisées puisque le diamètre exact des tiges correspond rarement avec le centre d'une classe.

Des placettes permanentes, ayant fait l'objet d'une deuxième mesure, servent à valider les prédictions du simulateur. Dans le cas de placettes permanentes où les DHP sont mesurés au millimètre près, nous devons aussi les regrouper par classe de DHP, dont l'amplitude de deux cm si l'on désire s'en servir pour valider le modèle. La fonction *FAITMTABLEP*, présentée dans un rapport interne de la Direction de la recherche forestière (Carpentier 1995), a été élaborée afin de préparer les matrices pour chacune des dix essences, au temps 1 et au temps 2. Ces 20 matrices représentent des tables de peuplement, elles sont également incluses dans le rapport interne. Nous ne joignons ici que les informations concernant les tiges de bouleau jaune des 54 premières placettes pour les mesures 1 et 2. Ces données sont présentées aux tableaux 7.26 et 7.27.

Les tiges vivantes sont réparties en 33 classes de DHP de 2 cm. Un grand nombre de cellules comportent des zéros puisque le nombre de tiges de bouleau jaune par placette varie de 2 à 21. Lorsque la perturbation à l'origine du peuplement remonte à moins de cinquante ans, on observe habituellement beaucoup de tiges dans les faibles classes de DHP. Si son origine remonte à plus longtemps, on retrouve moins de tiges et elles sont dispersées dans les classes supérieures de DHP.

Lorsque l'on compare attentivement les tableaux 7.26 et 7.27, on constate que de nouvelles tiges sont apparues (recrutement) dans les premières classes de DHP, d'autres sont disparues (mortalité), alors que d'autres ont progressé vers une classe de DHP supérieure. Ce dernier cas indique le résultat d'un accroissement des survivants.

★

7.3.1 Imprécision engendrée par l'élaboration de tables de peuplement entre le temps 1 et le temps 2

La croissance des arbres étant plutôt faible sur un horizon de prédiction d'environ sept ans, nous considérons utile d'évaluer l'importance de l'imprécision engendrée par la distribution des tiges dans les classes de DHP de 2 cm. Pour estimer un tel biais par essence, par placette et par mesure, nous avons construit la fonction *BIA/SDIST* présentée dans un rapport interne de la DRF (Carpentier 1995). Dans les tableaux 7.28 et 7.29, le biais, par essence et par placette, s'exprime en comparant la surface terrière estimée avec les DHP exacts mesurés au millimètre près et la surface terrière estimée selon la distribution des tiges par classe de DHP. Dans certain cas, le biais peut être important.

Au tableau 7.30, on peut voir que le biais en surface terrière peut aller jusqu'à 20,76 % dans le cas extrême. Ce cas survient lorsqu'il n'y a qu'une seule tige d'une essence donnée dans une placette et que le DHP réel de la tige se situe près de la frontière entre deux classes. Par exemple, une tige de 9,1 cm avec un centre de classe de 10 cm, occasionne une telle imprécision.

Les tableaux 7.28 et 7.29 indiquent que les biais par placette sont plus faibles lorsque l'effectif devient important. Parmi les 50 premières placettes à la mesure initiale pour le bouleau jaune, on découvre les pourcentages de biais en surface terrière s'étendant de -5,49 et à 3,58 au tableau 7.28. Pour la placette n° 1, on obtient les valeurs rapportées au tableau 7.31.

Le biais de l'accroissement dû à la distribution par classe de DHP par rapport à l'accroissement calculé selon les DHP exacts s'établit ainsi :

$$(-0,0066 \div 0,0887) = -7,44 \%$$

Ce biais relatif est minimisé par l'importance de l'accroissement qui est fonction de l'effectif de la placette. Ce biais est aussi influencé par la composition en essence et la dimension des placettes. Duplat et Perrotte (1981) rapportent que l'erreur sur la surface terrière varie avec la structure du peuplement. La distribution exponentielle conduisant à des pourcentages d'erreur cinq fois plus élevés que la distribution Béta qui prend une allure de cloche.

Tableau 7.28 Estimation du biais par essence et par placette entre les surfaces terrières calculées selon le DHP exact et selon une distribution par classe de DHP, matrice VOLPLBOJ1

NO PLAC.	SURFACE TERRIERE ESTIMÉE PAR ARBRE INDIVIDUEL	PAR CLASSE DE DHP	BIAIS EN (m*2)	BIAIS EN (%)
1	0.4298	0.4339	-0.0040	-0.9381
2	0.1281	0.1304	-0.0023	-1.8130
3	0.3422	0.3333	0.0088	2.5841
4	0.6113	0.5991	0.0122	2.0026
5	0.4356	0.4433	-0.0077	-1.7583
6	0.5807	0.5868	-0.0062	-1.0664
7	0.4598	0.4744	-0.0145	-3.1611
8	0.2261	0.2180	0.0081	3.5830
9	0.2632	0.2592	0.0040	1.5169
10	0.1884	0.1876	0.0009	0.4548
11	0.2761	0.2912	-0.0152	-5.4889
12	0.3083	0.3116	-0.0033	-1.0715
13	0.3282	0.3308	-0.0026	-0.7996
14	0.1664	0.1715	-0.0052	-3.1074
15	0.4696	0.4700	-0.0003	-0.0711
16	0.2878	0.2890	-0.0013	-0.4408
17	0.3324	0.3352	-0.0028	-0.8300
18	0.4246	0.4244	0.0002	0.0444
19	0.2263	0.2306	-0.0043	-1.8885
20	0.6040	0.6026	0.0014	0.2361
21	0.3804	0.3968	-0.0164	-4.3017
22	0.0907	0.0920	-0.0013	-1.4869
23	0.6896	0.6846	0.0050	0.7255
24	0.3759	0.3773	-0.0014	-0.3609
25	0.3311	0.3405	-0.0095	-2.8687
26	0.4157	0.4144	0.0013	0.3184
27	0.1104	0.1074	0.0029	2.6508
28	0.3334	0.3314	0.0020	0.5983
29	0.2726	0.2683	0.0043	1.5743
30	0.5499	0.5435	0.0064	1.1691
31	0.1693	0.1737	-0.0044	-2.6213
32	0.4763	0.4825	-0.0063	-1.3181
33	0.3002	0.3003	-0.0001	-0.0314
34	0.5271	0.5268	0.0002	0.0447
35	0.3025	0.3076	-0.0051	-1.6697
36	0.7284	0.7295	-0.0010	-0.1435
37	0.4546	0.4505	0.0041	0.9088
38	0.3855	0.3839	0.0016	0.4268
39	0.2343	0.2328	0.0015	0.6359
40	0.6202	0.6236	-0.0034	-0.5548
41	0.8679	0.8677	0.0002	0.0195
42	0.5578	0.5589	-0.0011	-0.2022
43	0.9594	0.9836	-0.0243	-2.5294
44	0.2796	0.2884	-0.0088	-3.1498
45	0.0991	0.0968	0.0024	2.3735
46	0.3347	0.3415	-0.0068	-2.0425
47	0.6601	0.6682	-0.0082	-1.2364
48	0.6584	0.6572	0.0012	0.1804
49	0.4016	0.4028	-0.0011	-0.2794
50	0.4217	0.4213	0.0004	0.0916
101 PEP	36.2459	36.2967	-0.0508	-0.1401

Tableau 7.29 Estimation du biais par essence et par placette entre les surfaces terrières calculées selon le DHP exact et selon une distribution par classe de DHP, matrice VOLPLBOJ2

NO PLAC.	SURFACE TERRIERE ESTIMÉE PAR ARBRE INDIVIDUEL	PAR CLASSE DE DHP	BIAIS EN (m*2)	BIAIS EN (%)
1	0.5185	0.5158	0.0026	0.5054
2	0.2009	0.2139	-0.0131	-6.5178
3	0.2602	0.2670	-0.0068	-2.6248
4	0.6872	0.7006	-0.0134	-1.9488
5	0.2486	0.2457	0.0030	1.1887
6	0.6187	0.6271	-0.0084	-1.3517
7	0.4611	0.4571	0.0040	0.8572
8	0.2939	0.3057	-0.0118	-4.0097
9	0.3388	0.3515	-0.0128	-3.7682
10	0.2266	0.2290	-0.0025	-1.0840
11	0.3783	0.3896	-0.0113	-2.9781
12	0.3741	0.3848	-0.0107	-2.8705
13	0.3368	0.3443	-0.0075	-2.2255
14	0.2091	0.2117	-0.0026	-1.2563
15	0.5138	0.5162	-0.0023	-0.4532
16	0.3219	0.3170	0.0049	1.5242
17	0.3688	0.3616	0.0072	1.9409
18	0.5247	0.5190	0.0057	1.0938
19	0.2886	0.2922	-0.0036	-1.2515
20	0.4670	0.4543	0.0127	2.7165
21	0.2786	0.2796	-0.0010	-0.3430
22	0.1502	0.1451	0.0051	3.3978
23	0.7324	0.7279	0.0045	0.6146
24	0.4387	0.4439	-0.0052	-1.1967
25	0.4055	0.4053	0.0002	0.0486
26	0.3381	0.3399	-0.0018	-0.5329
27	0.1415	0.1442	-0.0027	-1.8761
28	0.3714	0.3726	-0.0012	-0.3219
29	0.2983	0.2931	0.0052	1.7359
30	0.4430	0.4301	0.0129	2.9080
31	0.1991	0.1957	0.0034	1.7102
32	0.4575	0.4621	-0.0046	-1.0158
33	0.3874	0.3918	-0.0043	-1.1188
34	0.3351	0.3396	-0.0045	-1.3456
35	0.3761	0.3786	-0.0025	-0.6610
36	0.8135	0.8162	-0.0027	-0.3342
37	0.4740	0.4917	-0.0176	-3.7229
38	0.4185	0.4134	0.0051	1.2110
39	0.1785	0.1816	-0.0031	-1.7561
40	0.7130	0.7125	0.0004	0.0619
41	0.7029	0.7131	-0.0103	-1.4614
42	0.5516	0.5529	-0.0013	-0.2312
43	0.7040	0.7103	-0.0063	-0.9012
44	0.3402	0.3409	-0.0006	-0.1854
45	0.1782	0.1759	0.0023	1.2798
46	0.3273	0.3327	-0.0054	-1.6483
47	0.3855	0.3814	0.0042	1.0768
48	0.7194	0.7238	-0.0045	-0.6218
49	0.4778	0.4665	0.0112	2.3524
50	0.4930	0.4951	-0.0021	-0.4300
101 PEP	37.2353	37.3859	-0.1506	-0.4044

Tableau 7.30. Erreur maximale engendrée par la distribution en classe de DHP

État	DHP (cm)	Surface terrière (m ²)
Centre de classe	10,0	0,007854
Diamètre réel	9,1	0,006504
Erreur	0,9	0,001350
%	9,89	20,76

Tableau 7.31. Erreur en surface terrière engendrée par la distribution en classe de DHP pour la placette n° 1

	Par arbre	Par classe de DHP	Biais
STM 2 (m ²)	0,5185	0,5158	-0,0026
STM 1 (m ²)	0,4298	0,4339	+0,0040
accroissement	0,0887	0,0819	-0,0066
%			-7,44

7.3.2 Biais par essence pour l'ensemble des placettes

Pour juger de l'importance du biais ou de l'imprécision engendré par la répartition des tiges en classe de DHP, on peut établir ce biais par les changements observables de surface terrière d'une mesure à l'autre. D'après les tableaux 7.32 et 7.33, les biais pour le bouleau jaune sont respectivement de - 0,0508 et - 0,1506 mètre carré pour les mesures 1 et 2.

Au cours de la période de croissance 1-2, la surface terrière globale des bouleaux jaunes de l'ensemble des placettes est passée de 36,2459 à 37,2353 mètres carrés, pour une augmentation de 0,9894. Si on divise les biais de -0,0508 et -0,1506 par cette différence réellement observée entre la mesure 1 et la mesure 2, on obtient un biais relatif (BR) pour les 101 placettes. Nous calculons le biais relatif en surface terrière au moyen de la formule suivante :

$$BR (ACC_{st}) = \frac{ACC_{st} (réel) - ACC_{st} (classe)}{ACC_{st} (réel)}$$

Ces biais ne sont pas négligeables, même si pour la plupart des essences, ils sont dans la même direction. Dans le cas du bouleau jaune, il y a tout de même une différence de biais relatif entre la mesure 1 et la mesure 2 d'environ 10 %. Dans la section 7.6, lorsque l'on jugera de la précision de l'ensemble du logiciel de prédiction, il faudra se rappeler que ces biais restent ceux de tout inventaire forestier conventionnel dans lequel les tiges sont regroupées par classe de DHP. En disposant de placettes permanentes mesurées avec une grande précision, nous avons pu procéder à une telle analyse.

7.4 Validation du logiciel de prédiction BOJRES

Dans cette section, nous traitons de la validation de l'ensemble du logiciel de prédiction *BOJRES*. D'après Duplat (1993), la précision des prédictions pour les essences et les classes de DHP ne peut pas être excellente, mais elle se révèle satisfaisante pour un ensemble de placettes en autant que le logiciel effectue les prédictions sans biais pour cet ensemble. Nous avons traité dans les chapitres précédents de la vérification des équations de chacune des composantes du système. Ces vérifications sommaires ont permis de nous assurer que la formulation

Tableau 7.32 Estimation du biais par essence entre les surfaces terrières calculées selon le DHP exact et selon une distribution par classe de DHP, pour la mesure 1

ESSENCE		SURFACE TERRIERE ESTIMÉE PAR ARBRE INDIVIDUEL	PAR CLASSE DE DHP	BIAIS EN (m*2)	BIAIS EN (%)
BOJ		36.2459	36.2967	-0.0508	-0.1401
BOP		4.2047	4.2584	-0.0538	-1.2785
ERS		2.6209	2.6568	-0.0360	-1.3719
ERR		2.8174	2.8391	-0.0217	-0.7703
PRP		0.3201	0.3267	-0.0066	-2.0729
SAB		18.0892	18.2432	-0.1540	-0.8515
EPB		5.2500	5.2631	-0.0131	-0.2499
EPR		1.6132	1.6317	-0.0186	-1.1514
THO		10.8336	10.7911	0.0425	0.3926
PRU		6.0408	5.8927	0.1481	2.4523
TOT		88.0357	88.1996	-0.1639	-0.1861

Tableau 7.33 Estimation du biais par essence entre les surfaces terrières calculées selon le DHP exact et selon une distribution par classe de DHP, pour la mesure 2

ESSENCE		SURFACE TERRIERE ESTIMÉE PAR ARBRE INDIVIDUEL	PAR CLASSE DE DHP	BIAIS EN (m*2)	BIAIS EN (%)
BOJ		37.2353	37.3859	-0.1506	-0.4044
BOP		4.9608	4.9826	-0.0217	-0.4384
ERS		3.1735	3.1856	-0.0121	-0.3803
ERR		3.1726	3.2296	-0.0570	-1.7952
PRP		0.5922	0.5934	-0.0013	-0.2125
SAB		20.8458	21.0524	-0.2066	-0.9911
EPB		6.0190	6.0670	-0.0481	-0.7984
EPR		2.0113	2.0273	-0.0160	-0.7947
THO		11.7333	11.6958	0.0375	0.3192
PRU		5.7929	5.8107	-0.0178	-0.3068
TOT		95.5367	96.0303	-0.4936	-0.5167

informatique des équations et que la transposition des coefficients estimés en utilisant le progiciel *STATGRAPHICS PLUS*, ont été réalisées sans erreur. Ces vérifications n'assurent cependant pas que l'architecture logique du logiciel de simulation dans son ensemble est valide et qu'il est robuste dans ses prédictions au niveau de chacune des placettes. Il faut maintenant pousser plus loin nos investigations pour évaluer sa performance. Avant de le remettre à des aménagistes forestiers, des efforts doivent être entrepris pour déterminer dans quelle mesure le modèle performe réellement. Pour la prédiction ou l'estimation des caractéristiques d'intérêt, les modèles de prédiction sont publiés trop souvent sans avoir subi une validation adéquate. Cette situation résulte du peu de discussions dans la littérature scientifique sur la philosophie et les procédures, à utiliser dans ce contexte, qui puissent servir de guide.

7.4.1 Caractérisation de la situation à traiter

L'objectif principal de ce travail vise à développer un système de prédiction de l'état futur de plusieurs variables d'intérêt d'un peuplement ou plus exactement d'une placette. Ici, la variable finale la plus intéressante pour l'utilisateur du modèle est le volume marchand brut (VMB). La prédiction est obtenue à partir de conditions initiales qui sont des variables faciles à mesurer sur le terrain. La liste des arbres marchands par essence est l'intrant principal, de celle-ci nous obtenons les DHP individuels, le nombre de tiges, la surface terrière marchande, le DHP moyen et l'indice de densité de la placette. Ces statistiques sont calculées tant pour chacune des essences que pour leur ensemble.

Posons OBS_i comme une valeur observée de la variable d'intérêt, c'est-à-dire celle que nous désirons prédire à partir du vecteur $\underline{X} = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ représentant les p variables (intrant) du système (par exemple, OBS_i peut représenter le volume marchand brut au temps final, observé sur le terrain pour la i ème placette). Posons $CAL_i = CAL(\underline{X})$ comme la valeur prédite par le modèle formulé à partir des p variables explicatives représentées par $\underline{X}$.

Pour juger de la qualité des prédictions du modèle et éventuellement de sa précision, il convient de déterminer l'écart ou le manque de proximité entre les valeurs prédites (CAL_i) et les valeurs observées (OBS_i) de la variable d'intérêt. Ces écarts (D_i) sont calculés ainsi :

$$D_i = OBS_i - CAL_i$$

Pour une placette donnée, si la variable D prend une valeur positive, alors cela signifiera que la valeur prédite (CAL_i) est plus faible que la valeur observée (OBS_i). Le modèle aura donc sous-évalué la prédiction pour cette observation. Idéalement la situation inverse devrait prévaloir dans une proportion de $n/2$ observations si le modèle est non biaisé.

Concernant l'estimation du biais pour un échantillon de valeurs observées et de valeurs prédites correspondantes, $E(D | \underline{X})$ comme étant la moyenne conditionnelle de D étant donné $\underline{X}$, c'est-à-dire :

$$E(D | \underline{X}) = E(OBS - CAL | \underline{X})$$

Cette espérance mathématique est estimée par la moyenne d'échantillonnage en $\underline{X}$, la moyenne d'échantillonnage calculée à partir d'un sous-échantillon caractérisé par le vecteur des variables explicatives $\underline{X}$. Cette moyenne échantillonnale est un estimateur du biais conditionnel du modèle pour les n placettes à l'étude, caractérisées par le vecteur des variables explicatives $\underline{X}$.

Sous l'hypothèse que le biais est nul, il est possible que le modèle produise parfois des sous-évaluations ou des sur-évaluations inacceptables de la variable d'intérêt au niveau des placettes. C'est par la somme des écarts au carré ou encore, par la variance échantillonnale que nous serons en mesure de juger de la précision du modèle.

7.4.2 Calcul de la précision au moyen d'erreurs critiques

Pour déterminer si un modèle de prédiction est adéquat, un utilisateur peut comparer l'erreur e qu'il est prêt à accepter à un risque α . Pour ce faire, il s'agit de calculer l'erreur critique e^* définie comme étant la plus petite valeur de e conduisant à l'acceptation de l'hypothèse nulle du test de Freese (1960). Si la valeur de e est inférieure à la valeur e^* , le modèle sera alors considéré valable pour l'utilisateur au seuil de signification α' et inversement dans l'alternative.

L'erreur critique e^* , associée au test de Freese de seuil α' , est calculée par la formule suivante :

$$e^* = \left[\sum_{i=1}^n D_i^2 \chi^2_{1-\alpha'}(1) / \chi^2_{1-\alpha'}(n) \right]^{1/2} \quad (7.1)$$

Ek et Monserud (1979) ont utilisé cette statistique pour comparer la précision de deux modèles de prédiction. Reynolds (1984) a introduit une deuxième erreur critique e^{**} , inspirée d'une version plus conservatrice du test de Freese (1960). Celle-ci s'obtient par la formule suivante :

$$e^{**} = \left[\sum_{i=1}^n D_i^2 \chi_{1-\alpha}^2(n) / \chi_{\alpha}^2(n) \right]^{1/2} \quad (7.2)$$

Par définition, cette deuxième erreur critique e^{**} est toujours plus conservatrice que l'erreur critique e^* dans tous les cas où

$$\alpha = \alpha' < 0,5$$

Lorsque l'on utilise ensemble ces deux erreurs critiques de la distribution de $|D|$, on obtient un intervalle de confiance à $(1 - \alpha')$ 100 pour cent pour le $(1 - \alpha)$ ^{ème} quantile de la distribution de $|D|$ sous l'hypothèse nulle que l'espérance mathématique de la variable D est égale à zéro [$E(D) = 0$]. L'intervalle de zéro jusqu'à la deuxième erreur critique ($0, e^{**}$) est considéré par Reynolds (1984) comme un intervalle de confiance unilatéral à $(1 - \alpha')$ 100 pour cent pour le paramètre ε défini comme :

$$\varepsilon = [VAR(D) \chi_{1-\alpha}^2(n)]^{1/2}$$

On peut également obtenir un intervalle de confiance bilatéral défini par (e^*, e^{**}) , si on se sert simultanément des deux erreurs critiques. Il s'agit là d'un intervalle de confiance à $(1 - 2\alpha')$ 100 pour cent.

En résumé, ces erreurs critiques peuvent être interprétées comme étant les bornes de l'intervalle de confiance du paramètre ε ou du $(1 - \alpha)$ ^{ème} quantile de la distribution de $|D|$ pour autant que le modèle soit non biaisé [$E(D) = 0$]. Étant donné que ce n'est pas nécessaire le cas en pratique et que nous sommes également intéressés, d'autres techniques d'estimation de l'adéquacité du modèle seront présentées dans les sections suivantes.

7.4.3 Détermination de l'intervalle de confiance de l'erreur probable

À la section précédente, les erreurs critiques e^* et e^{**} dérivées des formulations de Freese (1960) et de Reynolds (1984) pouvaient être interprétées comme des intervalles de confiance pour un certain quantile de la distribution de $|D|$, sous l'hypothèse d'un modèle sans biais.

Le modèle peut cependant être biaisé et l'intérêt peut être de savoir non pas si le modèle performe bien globalement mais s'il peut être utilisé avec confiance pour faire des prédictions. Nous utilisons alors la formulation de Reynolds (1984) pour déterminer des intervalles de confiance de prédiction et de tolérance pour l'écart. Même si la moyenne de D n'est pas nécessairement égale à zéro, il apparaît raisonnable de faire l'hypothèse que sa distribution est approximativement normale si la valeur de n est suffisamment grande. La moyenne d'échantillonnage est établie ainsi :

$$\bar{D} \pm \sum_{i=1}^n D_i / n$$

est donc un estimateur sans biais de $E(D)$.

Un intervalle de confiance de niveau $(1 - \alpha)$ 100 pour cent pour l'espérance mathématique de D est fourni par l'expression suivante :

$$\bar{D} \pm S t_{1-\alpha/2}(n-1) / \sqrt{n} \quad (7.3)$$

où

$$S = \left[\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2 / (n-1) \right]^{1/2}$$

et où la valeur de t est déterminée pour le $(1 - \alpha/2)$ ^{ème} quantile de la distribution centrale de Student à $(n - 1)$ degrés de liberté. L'intervalle de confiance pour $E(D)$ ou encore de la moyenne des écarts dans la population se calcule par l'expression 7.3. Il fournit une information sur la valeur de $E(D)$ ou encore de la moyenne des écarts dans la population, c'est-à-dire l'utilisation à long terme du modèle pour un grand nombre d'unités de sondage (placettes).

7.4.4 Intervalle de confiance pour une prédiction unique

En pratique, le modèle de prédiction peut être utilisé par un aménagiste pour une seule prédiction. Il devient alors intéressant de construire un intervalle particulier de confiance pour l'écart lorsque le modèle est utilisé que pour une seule prédiction. Cet intervalle est désigné dans la littérature par « intervalle de confiance pour une prédiction unique » ou plus simplement « intervalle de prédiction ». Cet intervalle s'obtient en se servant d'une formule semblable à celle employée en régression pour calculer les intervalles

Tableau 7.34 Validation du système de prédictions BOJRES pour le volume marchand brut (VMB) pour l'essence BOJ

NOPL	VOLUME MARCHAND		ÉCART ALGÈBRIQUE	ÉCART RELATIF EN POURCENTAGE	ÉCART AU CARRÉ
	BRUT (METRES CUBES) PRÉDIT	OBSERVÉ			
1	3.0086	3.0293	0.0207	0.6823	0.0004
2	0.7618	0.7182	-0.0437	-6.0789	0.0019
3	2.6675	2.1534	-0.5142	-23.8781	0.2644
4	4.5224	5.1990	0.6766	13.0143	0.4578
5	3.2241	1.8679	-1.3562	-72.6076	1.8393
6	3.9685	5.3705	1.4021	26.1068	1.9658
7	3.7673	3.5799	-0.1874	-5.2351	0.0351
8	1.7451	1.7157	-0.0294	-1.7126	0.0009
9	1.7974	2.2509	0.4535	20.1484	0.2057
10	1.2159	1.3257	0.1098	8.2835	0.0121
11	1.4464	1.4743	0.0278	1.8882	0.0008
12	2.5509	2.2425	-0.3085	-13.7562	0.0952
13	2.9279	3.1165	0.1886	6.0525	0.0356
14	1.2743	1.3942	0.1199	8.6004	0.0144
15	3.2761	3.3947	0.1186	3.4936	0.0141
16	1.6123	1.7698	0.1575	8.9011	0.0248
17	2.1199	2.2223	0.1024	4.6070	0.0105
18	2.8721	3.2635	0.3914	11.9933	0.1532
19	1.6538	2.2123	0.5585	25.2451	0.3119
20	3.6213	2.8436	-0.7777	-27.3475	0.6047
21	3.1412	1.9948	-1.1464	-57.4703	1.3142
22	0.6057	0.7823	0.1766	22.5789	0.0312
23	4.9152	5.3369	0.4217	7.9012	0.1778
24	2.1956	2.6364	0.4408	16.7211	0.1943
25	2.2946	2.2640	-0.0306	-1.3507	0.0009
26	2.5908	1.8549	-0.7359	-39.6736	0.5416
27	0.7490	0.7828	0.0338	4.3165	0.0011
28	2.2410	2.1387	-0.1023	-4.7830	0.0105
29	1.8753	1.7373	-0.1380	-7.9421	0.0190
30	4.3671	4.7864	0.4193	8.7595	0.1758
31	1.0353	0.8821	-0.1531	-17.3605	0.0235
32	3.4792	3.1754	-0.3038	-9.5663	0.0923
33	2.3104	2.4606	0.1502	6.1022	0.0225
34	3.4561	2.4527	-1.0034	-40.9124	1.0069
35	2.5768	2.5129	-0.0640	-2.5452	0.0041
36	6.4516	7.8133	1.3618	17.4288	1.8544
37	3.0082	3.9908	0.9826	24.6215	0.9655
38	2.7431	3.2408	0.4977	15.3582	0.2477
39	2.0894	1.1263	-0.9631	-85.5155	0.9276
40	4.6909	5.1557	0.4648	9.0148	0.2160
41	4.6464	4.9784	0.3320	6.6688	0.1102
42	4.7504	3.8098	-0.9406	-24.6885	0.8847
43	6.3574	4.8485	-1.5089	-31.1219	2.2769
44	2.4022	2.3896	-0.0126	-0.5260	0.0002
45	0.7272	0.7956	0.0684	8.5916	0.0047
46	2.2376	2.1037	-0.1339	-6.3644	0.0179
47	3.2241	2.1777	-1.0464	-48.0527	1.0950
48	4.5988	4.2937	-0.3051	-7.1057	0.0931
49	2.5340	2.5404	0.0064	0.2511	0.0000
50	3.1751	3.2485	0.0734	2.2596	0.0054
101 PEP	251.6452	248.7499	-2.8953	-1.1639	42.6585
Coefficient du pouvoir explicatif du modèle				(R*2) =	0.7900

de prédiction d'une observation future de la variable dépendante. Dans notre contexte, on peut calculer un intervalle similaire au moyen de la formule suivante :

$$\bar{D} \pm \sqrt{1 + \frac{1}{n}} S t_{1-\alpha/2}(n-1) \quad (7.4)$$

Ainsi, l'interprétation de cet intervalle est que la probabilité sera de $(1 - \alpha)$ 100 pour cent qu'une valeur future de D soit comprise dans cet intervalle de confiance.

7.4.5 Intervalle de tolérance pour un grand nombre de prédictions

Lorsque le modèle est utilisé pour un grand nombre de prédictions, l'utilisateur est intéressé à déterminer les limites où se trouve une proportion donnée de la distribution de D . Par exemple, il peut être intéressant de calculer un intervalle contenant 95 % des erreurs futures dans la population, c'est-à-dire lors d'une utilisation à long terme du modèle.

En général, comme les paramètres $E(D)$ et $Var(D)$ de la population ne sont pas connus, on calculera l'intervalle de tolérance au moyen de la formule suivante :

$$\bar{D} \pm g(1 - \gamma, n; 1 - \alpha) S$$

On peut trouver les valeurs de la fonction $g(1 - \gamma, n; 1 - \alpha)$ dans Eisenhart *et al.* (1947) pour différentes valeurs de $(1 - \gamma)$, n et $(1 - \alpha)$. L'interprétation de cet intervalle est que si des intervalles de tolérance sont calculés un grand nombre de fois à partir de différents échantillons aléatoires de taille n , alors ces intervalles contiendront au moins une proportion $(1 - \gamma)$ des écarts (D_i) dans une proportion de $(1 - \alpha)$ 100 pour cent des cas.

7.5 Inférences statistiques concernant la précision des prédictions

Les prédictions du simulateur en terme de volume marchand brut (VMB) sont comparées aux valeurs observées à la fin de la période de croissance 1-2 pour chacune des 101 placettes. Les résultats sommaires n'apparaissent que pour les 50 premières placettes au tableau 7.34 pour le bouleau jaune (BOJ). En colonne 3, où l'on a l'écart de prédiction pour chacune des placettes, on y retrouve 23 valeurs positives et 27 valeurs négatives. La somme des écarts de prédiction pour les 101 placettes étant égale à -2,8953 mètres cubes signifie que les valeurs négatives sont plus faibles même si ces dernières sont plus nombreuses dans les 51 premières placettes. L'écart relatif en pourcentage pour l'ensemble des placettes est de $(-2,895 \div 248,750) = -1,16\%$. Il semble donc y avoir

un léger biais négatif pour le bouleau jaune. Nous verrons à la section suivante que ce biais est non significatif.

À la dernière ligne de ce tableau, la statistique (R^2) évalue le pouvoir prédictif du modèle au niveau de chacune des placettes pour l'essence étudiée. Sa valeur est obtenue par une formule semblable à celle utilisée en régression pour l'estimation du coefficient de détermination R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (PRD - OBS)^2}{\sum (OBS - \bar{OBS})^2}$$

La valeur de 0,79, signifie que le modèle est capable d'expliquer 79 % de la variation totale de l'ensemble des placettes. Des statistiques semblables sont calculées pour chacune des essences et elles sont résumées dans le tableau 7.35. L'écart relatif moyen atteint en pourcentage un maximum de 7,1 % pour une essence marginale, soit le cerisier de Pennsylvanie (PRP); ainsi, les prédictions sont les moins précises avec cette essence. En général, les résultats se révèlent cependant adéquats. Nous verrons à la prochaine section dans quelle mesure cette affirmation est justifiée statistiquement.

7.6 Statistiques de validation du système BOJRES pour l'écart du volume marchand brut

À partir des résultats montrés à la section 7.5 et des formules statistiques à la section 7.4, des compilations intéressantes ont été obtenues. Dans le cas du bouleau jaune (voir le tableau 7.36), nous avons obtenu un écart de prédiction moyen (D MOYEN) de $-0,029 \text{ m}^3$ avec un écart type (S de D MOYEN) de $0,065 \text{ m}^3$. Cet écart est environ deux fois plus grand que la moyenne qui appartient au voisinage de zéro. Sur la base de ces résultats, on ose espérer qu'il n'y a pas de biais dans l'ensemble des prédictions pour cette essence.

Pour pouvoir interpréter adéquatement les intervalles de confiance, de prédiction et de tolérance, ainsi que les erreurs critiques, on doit d'abord vérifier si les écarts observés sont normalement distribués. De plus, dans le cas des erreurs critiques, ces écarts doivent être également de moyenne nulle. Ces hypothèses peuvent se vérifier par les tests de Kolmogorov, de Cramér-von Mises et de Anderson-Darling. Dans le cas du bouleau jaune, les trois tests montrent des seuils de significativité observés (P -value) se situant entre 0,01 et 0,05. Ainsi, on en conclut que les écarts (D_i) ne proviennent pas vraiment d'une distribution normale de moyenne nulle. Toutefois, comme les

Tableau 7.35 Validation du système de prédiction BOJRES pour le volume marchand brut (VMB) par essence et pour l'ensemble des essences

ESSENCE	VOLUME MARCHAND BRUT (METRES CUBES)		ÉCART ALGÈBRIQUE MOYEN	ÉCART REL. MOYEN EN (%)	R*2
	PRÉDIT	OBSERVÉ			
BOJ	250.4259	248.7499	-1.6759	-0.6737	0.7942
BOP	28.3090	27.5118	-0.7972	-2.8977	0.8552
ERS	19.9503	20.1123	0.1620	0.8054	0.9865
ERR	15.8763	15.3608	-0.5154	-3.3555	0.7915
PRP	2.1580	2.3254	0.1674	7.1992	0.9514
SAB	105.7866	110.4647	4.6781	4.2349	0.8413
EPB	39.1459	40.5788	1.4329	3.5311	0.9761
EPR	12.2393	12.7964	0.5571	4.3536	0.9890
THO	64.1799	63.8025	-0.3774	-0.5915	0.9650
PRU	49.1789	46.7481	-2.4308	-5.1997	0.9362
TOT	587.2500	588.4507	1.2007	0.2040	0.8718

seuils de significativité (*P-value*) sont supérieurs à 0,01, nous allons quand même interpréter les résultats avec certaines réserves.

Pour le bouleau jaune (voir le tableau 7.36), l'intervalle de confiance à 95 % du biais est estimé à (-0,165, 0,107). Le fait que l'intervalle contienne la valeur zéro, fournit une indication à l'effet que le modèle n'est pas biaisé pour cette essence. Aussi, on peut donc interpréter les erreurs critiques en plus des erreurs de prédiction et de tolérance.

Avec les deux erreurs critiques e^* et e^{**} , il est possible de construire un intervalle de confiance à $1 - \alpha = 95\%$ du $1 - \alpha = 95^e$ percentile de la distribution des écarts en valeurs absolues IDI. Cet intervalle de confiance, qui est défini comme (e^* , e^{**}), fournit un ordre de grandeur pour l'erreur maximale anticipée. Cette dernière est susceptible de se produire dans moins de $\alpha = 5\%$ des cas.

Par ailleurs, l'intervalle de prédiction à 95 % est estimé par (-1,396, 1,339) pour cette même essence. Cet intervalle peut s'interpréter en affirmant que dans 95 % des cas, l'écart de prédiction d'une observation quelconque sera compris dans cet intervalle.

Les tableaux 7.37 et 7.38 contiennent un résumé des diverses statistiques pour les autres essences et pour l'ensemble des essences confondues. Dans le premier tableau, la deuxième essence principale, le sapin baumier, obtient des statistiques de Kolmogorov, de Cramér-von Mises et de Anderson-Darling très semblables à celles déjà obtenues pour le bouleau jaune. Nous rappelons que les intervalles de confiance, de prédiction et de tolérance doivent être acceptés avec réserve. Dans le cas des autres essences, on peut difficilement conclure sur le biais, dû au fait que les seuils de comparaison que l'on a utilisé pour nos tests (formes modifiées) sont basés sur des résultats asymptotiques (c'est-à-dire pour des grands n). Pour ce faire, il faudrait obtenir des seuils de comparaison appropriés aux petites tailles d'échantillon.

Les résultats globaux pour le regroupement de toutes les essences (TOT) sont très satisfaisants. Les écarts sont normalement distribués, avec des seuils de signification (*P-values*), tous supérieurs à 0,01. Ainsi, les erreurs critiques e^* et e^{**} , de même que les intervalles de confiance, de tolérance et de prédiction, nous permettent de conclure que le modèle est fiable. Tous ces intervalles sont résumés aux tableaux 7.37 et 7.38.

Tableau 7.36 Statistiques de validation du système de prédiction BOJRES en terme d'écarts en volume marchand brut (VMB) en mètres cubes pour l'essence BOJ

STATISTIQUES AVANT CENTRAGE	VALEURS CALCULÉES	SEUILS CRITIQUES DE NIVEAU α		
		0.10	0.05	0.01
NOMBRE D'OBSERVATIONS.....	101			
D MOYEN.....	-0.029			
VARIANCE DE D.....	0.426			
S DE D	0.652			
S DE D MOYEN.....	0.065			
DIUP.....	-2.032			
DIDOWN.....	1.585			
S2 SOUS H0.....	0.422			
ZIDOWN.....	4.125			
FDIUP.....	0.001			
K+.....	0.107			
K-.....	0.159			
K = Kolmogorov.....	0.159			
Km = Kolmogorov modifié.....	1.602	1.180	1.380	1.610
W2 = Cramér-von Mises.....	0.604	0.329	0.443	0.723
A2 = Anderson-Darling.....	3.146	1.760	2.323	3.790
E* = Erreur critique 1 ($\alpha=\alpha'=0.05$)..	1.143			
E**= Erreur critique 2 ($\alpha=\alpha'=0.05$)..	1.442			

STATISTIQUES	BORNE INFÉRIEURE	BORNE SUPÉRIEURE
Intervalle de Conf. de D moyen à 95%	-0.164	0.107
Intervalle de Prédiction de D à 95%.	-1.396	1.339
Intervalle de Tolérance de D à 95%..	-1.480	1.423

STATISTIQUES APRES CENTRAGE	VALEURS CALCULÉES	SEUILS CRITIQUES DE NIVEAU α		
		0.10	0.05	0.01
NOMBRE D'OBSERVATIONS.....	101			
D MOYEN.....	0.000			
VARIANCE DE D.....	0.426			
S DE D	0.652			
S DE D MOYEN.....	0.065			
DIUP.....	-2.003			
DIDOWN.....	1.614			
ZIDOWN.....	4.125			
FDIUP.....	0.001			
K+.....	0.091			
K-.....	0.177			
K = Kolmogorov.....	0.177			
Km = Kolmogorov modifié.....	1.759	0.819	0.895	1.035
W2 = Cramér-von Mises.....	0.668			
W2 = Cramér-von Mises modifié.....	0.671	0.104	0.126	0.178
A2 = Anderson-Darling.....	3.278			
A2 = Anderson-Darling modifié.....	3.400	0.656	0.918	1.092
E* = Erreur critique 1 ($\alpha=\alpha'=0.05$)..	1.142			
E**= Erreur critique 2 ($\alpha=\alpha'=0.05$)..	1.440			

Tableau 7.37 Statistiques de validation du système de prédictions BOJRES en terme de normalité des écarts de volume marchand brut (VMB) en mètres cubes pour toutes les essences confondues

ESS.	NOMBRE OBS.	D MOYEN	VARIANCE DE D	S DE D MOYEN	KOLMO- GOROV	KOLMOGOROV MODIFIÉ	CRAMÉR- VON MISES	ANDERSON- DARLING
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
BOJ	101	-0.029	0.426	0.065	0.159	1.602	0.604	3.146
BOP	96	-0.009	0.026	0.016	0.292	2.860	2.416	12.085
ERS	97	-0.001	0.004	0.006	0.388	3.817	3.934	18.148
ERR	101	-0.006	0.023	0.015	0.329	3.301	4.060	18.947
PRP	71	0.002	0.000	0.002	0.361	3.040	2.536	11.844
SAB	101	0.041	0.110	0.033	0.161	1.616	0.416	2.191
EPB	101	0.013	0.010	0.010	0.294	2.951	2.662	12.631
EPR	61	0.008	0.003	0.007	0.397	3.102	2.724	12.435
THO	63	-0.006	0.064	0.032	0.297	2.360	1.907	9.323
PRU	45	-0.064	0.327	0.085	0.388	2.604	2.300	11.102
TOT	101	-0.016	0.791	0.088	0.074	0.742	0.114	0.642

Tableau 7.38 Statistiques de validation du système de prédictions BOJRES en terme d'intervalles en volume marchand brut (VMB) en mètres cubes pour toutes les essences confondues

ESS.	INTERVALES DE CONFIANCE		INTERVALES DE PRÉDICTION		INTERVALES DE TOLÉRENCE		ERREURS CRITIQUES	
	(INF.	SUP.)	(INF.	SUP.)	(INF.	SUP.)	(E★	E★★)
BOJ	(-0.16,	0.11)	(-1.40,	1.34)	(-1.48,	1.42)	(1.14,	1.44)
BOP	(-0.04,	0.02)	(-0.35,	0.33)	(-0.37,	0.35)	(0.28,	0.36)
ERS	(-0.01,	0.01)	(-0.13,	0.13)	(-0.14,	0.14)	(0.11,	0.14)
ERR	(-0.04,	0.03)	(-0.32,	0.31)	(-0.34,	0.33)	(0.26,	0.33)
PRP	(0.00,	0.01)	(-0.04,	0.05)	(-0.05,	0.05)	(0.04,	0.05)
SAB	(-0.03,	0.11)	(-0.65,	0.74)	(-0.70,	0.78)	(0.59,	0.74)
EPB	(-0.01,	0.03)	(-0.19,	0.22)	(-0.21,	0.23)	(0.17,	0.22)
EPR	(-0.01,	0.02)	(-0.11,	0.13)	(-0.12,	0.14)	(0.10,	0.13)
THO	(-0.07,	0.06)	(-0.54,	0.52)	(-0.59,	0.58)	(0.43,	0.58)
PRU	(-0.24,	0.11)	(-1.27,	1.14)	(-1.43,	1.30)	(0.95,	1.35)
TOT	(-0.20,	0.17)	(-1.88,	1.85)	(-1.99,	1.96)	(1.56,	1.96)

Conclusion générale

Les propos des chapitres précédents constituent un reflet fidèle des grandes étapes de cette recherche. Tout d'abord, nous avons exploré la littérature pour rechercher la meilleure voie dans l'analyse de problèmes particuliers. L'avenue privilégiée ici est innovatrice dans le sens que nous choisissons des processus de traitements différents selon les phénomènes analysés et dans le sens de la distinction que nous apportons entre la conception et l'utilisation du système de simulation. Nous nous adaptons à des ensembles de données dont les niveaux de finesse ne sont pas les mêmes.

Dans l'analyse de la relation exprimant la hauteur en fonction du DHP et de la hauteur dominante, nous adoptons la modélisation à deux niveaux, celui de l'« arbre individuel » pour le premier régresseur et celui du « peuplement entier » pour le second. Pour le cubage, en plus de faire intervenir l'effet de la relation précédente, nous prenons en considération les caractéristiques spécifiques des essences présentes en utilisant le tarif de cubage de Perron (1983).

Ces deux premières relations, conçues pour s'adapter dynamiquement aux différents peuplements, fournissent des intrants dans la méthode de projection de tables de peuplements pour générer les vecteurs de hauteur et de volume unitaire par classe de DHP. Les véritables moteurs, qui régissent le fonctionnement du système de simulation, proviennent des équations de régression qui représentent les trois phénomènes de croissance analysés respectivement dans les chapitres IV, V et VI. Rappelons succinctement que pour le premier phénomène, le recrutement, on fait intervenir des régresseurs « peuplement entier » réalisés à deux niveaux d'échantillonnage. Le premier considère la sous-population des arbres de l'essence considérée et le deuxième, la population globale formée de l'ensemble des arbres, toutes essences confondues. Pour le second phénomène, la

mortalité, on adopte une approche différente qui est liée aux jeux de données disponibles lors de l'utilisation du logiciel. En effet, les taux de mortalité s'expriment par classe de DHP et par essence. Les régresseurs sont les nombres de tiges vivantes réparties dans les différentes classes de DHP et le DHP du centre des classes. Pour le troisième phénomène, l'accroissement des survivants, on se sert des équations au même niveau que pour la mortalité. Par contre, on agit différemment pour estimer les coefficients des équations. Ces dernières utilisent la croissance réellement observée sur chacune des tiges comme variable dépendante. Cette croissance s'explique aux moyens de régresseurs provenant du niveau « arbre individuel » et du niveau « peuplement entier ».

Une fois le tout traduit en un programme informatique cohérent, le modèle peut être qualifié d'original. En effet, il est conçu en fonction des deux ensembles de données différents, celui des placettes-échantillons permanentes pour la conception et celui des placettes-échantillons temporaires disponibles chez l'aménagiste forestier pour l'utilisation.

Au chapitre sept, nous avons évalué la précision du modèle *BOJRES*. À la lumière des résultats obtenus, on constate qu'il fonctionne avec une précision acceptable. On appréciera différemment son pouvoir de prédiction en fonction des tâches que les utilisateurs lui confieront; par exemple, on pourra s'en servir comme base de comparaison pour analyser des effets positifs ou négatifs de perturbations ou de traitements sylvicoles. Le modèle devrait permettre de quantifier des différences entre la réalité et la prédiction. Nous spécifions que les prédictions réalisées pour des peuplements différents de ceux dont nous disposons devront être considérées avec circonspection. Dans de telles circonstances, les coefficients des différentes équations devront impérativement être réestimés. Une deuxième mise en garde concerne le niveau

d'utilisation. Si on désire des prédictions précises pour une placette ou encore pour un petit nombre de placettes, ce modèle sera alors mis à rude épreuve. Nous croyons que le potentiel de croissance en relation avec le micro-environnement, la vigueur et les aptitudes génétiques de chaque tige peut difficilement être expliqué avec les variables dendrométriques élémentaires qui sont actuellement disponibles.

Orientation de la recherche

Dans le domaine de la modélisation de l'accroissement du rendement des peuplements mélangés, il reste beaucoup d'avenues à explorer. Des déficiences subsistent, entre autres, dans la compréhension des relations écologiques de base entre les différents éléments composant les peuplements mélangés. Des modèles quantitatifs robustes deviennent essentiels pour l'évaluation de la productivité biologique et pour l'analyse de la viabilité économique. Pour y inclure la récolte de la matière ligneuse provenant de différents types de peuplements mélangés, il reste beaucoup de recherches à soutenir, particulièrement dans les scénarios où les cohortes doivent être éclaircies puis récoltées à des âges différents de rotation.

L'hétérogénéité des peuplements mélangés provient du grand nombre d'essences qui les constituent. Au cours de la croissance, elles évoluent de façon dynamique. Des approches innovatrices s'imposent pour la récolte des données dendrométriques et pour la modélisation qui s'ensuit. Il devient important d'innover afin de proposer des prescriptions sylvicoles qui conduisent à de saines décisions d'aménagement. L'approche actuellement en vigueur consiste à choisir une population plus ou moins homogène et à analyser les données disponibles. Ces observations proviennent tant de placettes temporaires que de placettes permanentes. Les données sont habituellement analysées par régression. On estime les coefficients des différentes équations au moyen de la méthode des moindres carrés. Il est pratiquement impensable d'analyser tous les mélanges d'essences que nous jugeons intéressants. Un réseau de placettes permanentes comme celui du MRN forme une banque de données précieuses pour permettre l'avancement des travaux. Il faudra également installer des dispositifs expérimentaux avec des mélanges contrôlés d'essences pour lesquels les autres facteurs seront constants, afin de vérifier des hypothèses et pour développer des régressions plus robustes.

Les arbres vivent en communauté. Ils se font compétition pour les ressources essentielles comme la lumière, l'eau et les éléments nutritifs nécessaires à leur survie et à leur croissance. Ces ressources se trouvant généralement limitées, il existe une forte concurrence entre les arbres du peuplement. Le stress créé par la proximité des voisins peut réduire la croissance ou même résulter en mortalité chez les arbres les plus faibles. Dans les peuplements denses, on constate généralement la mortalité des arbres chétifs et même la mortalité prématurée des branches inférieures des arbres dominants et codominants. Un spécialiste en architecture des arbres dirait de cette montée subite de cime que le taux de réinitialisation vers le haut est augmenté. Une compréhension complète de l'effet de voisinage est essentielle pour évaluer avec sagesse les différentes options d'aménagement dans les peuplements mélangés. L'étude de ce phénomène devra spécifier si ces effets varient en fonction d'une compétition interspécifique ou intraspécifique.

Jusqu'à maintenant, un grand nombre d'indices de compétition ont été développés en vue de la modélisation de la croissance forestière. Cependant, la plupart des travaux ont porté sur des peuplements monospécifiques et équiennes. Les indices de compétition, même logiques, semblent hautement empiriques et leur précision a été jugée par corrélation avec les taux de croissance observés. Une approche plus théorique est nécessaire pour généraliser les relations de compétition dans les peuplements composés de plusieurs espèces qui se sont installés à des moments différents (multi âgés). Dans ce contexte, Tillman et Jahn (1983) ont proposé un modèle intéressant par l'utilisation différentielle des ressources utiles. Ils ont essayé d'expliquer la coexistence des plantes en concurrence sur la base d'une utilisation différentielle des ressources. Un point fondamental de l'approche de Tillman et Jahn est qu'ils considèrent explicitement aussi bien la dynamique des ressources que celle des essences. La théorie des champs écologiques (*EFT*) peut également procurer un outil d'inspection utile à la quantification du phénomène complexe que demeure la compétition. Dans la théorie *EFT*, les influences spatiales entre les arbres sont quantifiées comme la pulsation de zones géométriques entourant les individus (Walters *et al.* 1982). Elle procure une méthode pour inclure les interactions spatiales entre les plants de différentes dimensions en vue d'établir les formes de croissance dans les modèles de la dynamique des plants vivant en communauté. Parce que la méthode utilise des grandeurs variables d'interaction spatiale en fonction des dimensions des plants, des conditions

climatiques qui prévalent, et des autres conditions écologiques, la théorie *EFT* pourrait servir d'exemple pour généraliser les relations de compétition dans les peuplements forestiers mélangés.

Comme pour toute population biologique, le modélisateur cherche donc à maximiser trois propriétés différentes de son modèle, à savoir :

- généralisation
- réalisme
- précision.

Dans tout modèle, Levins (1966) soutient que le modélisateur doit sacrifier au moins l'une de ces propriétés désirables pour atteindre un plus haut niveau dans les deux autres. Dans la majorité des écrits sur la croissance forestière publiés jusqu'à maintenant, la généralisation est sacrifiée au profit du réalisme et de la précision. C'est même sur ce dernier terme que l'on se base le plus souvent pour juger de la qualité d'un modèle. Étant donné les objectifs usuels des modélisateurs du rendement forestier, c'est une politique plausible et raisonnable. Cependant pour les peuplements mélangés, avec leur multitude d'états (passés, actuels et futurs), il semble désirable, du moins dans un premier temps, de mettre l'accent sur la généralisation et le réalisme, malgré la perte en précision. Les modèles qui peuvent produire des résultats biologiquement réalistes pour un très grand nombre de cas différents, semblent être la voie à suivre pour les prochains travaux de recherche.

La production en peuplements mélangés présente une solution à la monoculture, même si leur aménagement s'avère beaucoup plus complexe. L'évaluation des options sylvicoles et de l'aménagement des peuplements mélangés requiert des modèles de croissance et de rendement fiables et robustes. Le développement de ces modèles exige des approches innovatrices lors de la cueillette des observations dendrométriques et lors de la modélisation. Afin d'obtenir les données relatives à l'étude des différentes options sylvicoles, des dispositifs expérimentaux devront s'ajouter aux remesurages périodiques dans le réseau de placettes-échantillons permanentes du MRN. Celles-ci seront interprétées à la lumière de théories écologiques fiables et claires. L'ajustement des modèles aux données dendrométriques accroît la généralité même si on y sacrifie un peu de précision. Pour élaborer des modèles de croissance plus efficaces, on devra instaurer des équipes de travail qui réuniront les compétences de dendrométriciens, d'écologistes, d'aménagistes, d'informaticiens et de mathématiciens. Une équipe ainsi structurée serait en mesure de produire des résultats exceptionnels pour les autres types de peuplements mélangés pourtant négligés jusqu'à maintenant. Nonobstant les résultats obtenus dans le cadre de la présente recherche, la tâche dans son ensemble est à peine entamée.

*

Bibliographie

- ADAMS, D.M. et A.R. EK, 1975. *Optimizing the management of uneven-aged forest stands*. Can. J. For. Res. 4 : 274-287.
- ALDER, D., 1980. *Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers. Volume 2 : étude et prévision de la production*. Rome, FAO. (Études FAO : forêts n° 22/2). 229 p.
- AMATEIS, R., H.E. BURKHART et T.E. BURK, 1986. A ratio approach to predicting merchantable yields of unthinned loblolly pine plantations. For. Sci. 32 (2) : 287-296.
- ANTONIADIS, A., J. BERRUYER et R. CARMONA, 1992. *Régression non linéaire et applications*. Economica, Paris.
- ARABATZIS, A.A. et H.E. BURKHART, 1992. *An evaluation of sampling methods and model forms for estimating height-diameter relationships in loblolly pine plantations*. For. Sci. 38 (1) : 192-198.
- ARNEY, J.D., 1985. *A modeling strategy for the growth of managed stands*. Can. J. For. Res. 15 : 511-518.
- ASSMANN, E., 1970. *Waldertragskunde*. BLV München. Traduction par S.H. Gardiner : *The principles of forest yield study*. Oxford, Pergamon Press. 506 p.
- AVERY, E.T. et H.E. BURKHART, 1983. *Forest measurements*. McGraw-Hill. Third Edition, 331 p.
- BAILEY, R.L. et T.R. DELL, 1973. *Quantifying diameter distributions with the Weibull function*. For. Sci. 19 : 97-104.

- BARD, A., G. GERMAIN, R. LETARTE, C. NOËL, J.-Y. PERRON et R. TREMBLAY, 1975. *Normes d'inventaire forestier 1975*. Serv. de l'inventaire forestier, Min. des Terres et Forêts, Québec.
- BARTET, J.H., 1976. *Construction de tables de production à sylviculture variable pour le sapin du Jura*. Section tech., Off. Nat. des Forêts, Doc. n° 76-11.
- BECKER, M. et N. LE GOFF, 1988. *Diagnostic stationnel et potentiel de production*. Rev. For. Fr., XL (n° sp.) : 29-42.
- BEERS, T.W., 1962. *Components of forest growth*. J. For. 60 : 245-248.
- BÉGIN, J., 1991. *Productivité du Douglas vert (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco var. menziesii Franco) en relation avec des caractéristiques stationnelles*. Thèse présentée à l'École polytech. féd., Zurich. 172 p.
- BELCHER, D.W., M.R. HOLDAWAY et G.J. BRAND, 1982. *A description of STEMS : the stand and tree evaluation and modeling systems*. USDA, For. Serv., Gen. Tech. Rep. NC-79. 18 p.
- BLAIS, J.R., 1983. *Les forêts de la Côte-Nord au Québec sont-elles sujettes aux dégradations par la tordeuse ?* Forestry Chronicle 59(1) : 17-20.
- BOLGHARI, H.A. et V. BERTRAND, 1979. *Tables provisoires de production de quelques essences plantées au Québec*. Serv. de la rech. for., min. de l'Énergie et des Ress., Québec. Rapport interne n° 194.
- BOLGHARI, H.A. et V. BERTRAND, 1979. *Tables préliminaires de production des principales essences résineuses plantées dans la partie centrale du Sud du Québec*. Gouv. du Q., min. de l'Énergie et des Ress., Serv. de la rech. for. Mémoire n° 79. 392 p.
- BOUCHON, J., 1988. *Les tables de production et les modèles de croissance : un outil de diagnostic sylvicole*. Rev. For. Fr. XL (n° sp.) : 46-50.
- BOUDOUX, M., 1978. *Tables de rendement empiriques pour l'Épinette noire, le Sapin baumier et le Pin gris au Québec*. Québec, Serv. de l'information du min. des Terres et Forêts. 101 p. (plus fascicule de tableaux et graphiques en système métrique).
- BRUNER, H.D. et J.W. MOSER, 1973. *A Markov chain approach to the prediction of diameter distributions in uneven-aged forest stands*. Can. J. For. Res. 3 : 409-417.
- BUCKMAN, R.E., 1962. *Growth and yield of red pine in Minnesota*. USDA For. Serv. Tech. Bull. 1272. 50 p.
- BUFORD, M.A., 1991. *Performance of four yield models for predicting stand dynamics of a 30-year-old loblolly pine (Pinus taeda L.) spacing study*. For. Ecol. Manage. 46 : 23-38.
- BUONGIORNO, J. et B.R. MICHIE, 1980. *A matrix model of uneven-aged forest management*. For. Sci. 26 : 609-625.
- BURGMAN, M.A., 1994. *Mortality models for mountain and alpine ash*. For. Ecol. Manage. 67 : 319-327.
- BURK, T.E. 1978. *Characterizing the growth dynamics of Lake States aspen*. M.S. Thesis, Univ. of Minnesota, St. Paul. 90 p.
- BURKHART, H.E., R.C. PARKER, M.R. STRUB et R.G. ODERWALD, 1972. *Yield of old-field loblolly pine plantations*. Virginia Polytech. Inst. and State Univ., Div. For. and Wildl. Ressour. FWS-3-72, 51 p.
- BURKHART, H.E. et M.R. STRUB, 1974. *A model for simulation of planted loblolly pine stands*. Dans : J. Fries (éd.). *Growth models for tree and stand simulation*. Royal College of For. Stockholm. Res. Notes No. 30 : 128-135.
- CAILLIEZ, F., 1980. *Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers avec référence particulière aux forêts tropicales. Volume 1 : estimation des volumes*. Rome, FAO (Études FAO : forêts n° 22/1). 99 p.
- CARMEAN, W.H., 1970. *Site quality for eastern hardwood*. Dans : *The silviculture of oaks and associated species*. USDA For. Serv. Res. Pap. NE-144. 66 p.
- CARMEAN, W.H., 1978. *Site index curves for northern Wisconsin and upper Michigan*. USDA For. Serv. North Cen. For. Exp. Stn. Res. Pap. NC-160. 16 p.
- CARPENTIER, J.-P., 1987. *Modélisation de la croissance et du rendement des peuplements d'érable à sucre*. Dir. de la rech. for., min. de l'Énergie et des Ress., Québec. Mémoire n° 91. 160 p.

- CARPENTIER, J.-P., 1995. *Programmation relative à la modélisation de la croissance et du rendement des bétulaies jaunes à résineux*. Direction de la rech. for., min. des Ress. nat., Québec. Rapport interne n° 405. 196 p.
- CARPENTIER, J.-P., L. LACOMBE, et P. TARDIF, 1989. *Modélisation de la croissance et du rendement des peuplements de peuplier faux-tremble au Québec*. Dir. de la rech. for., min. de l'Énergie et des Ress., Québec. Mémoire n° 97. 228 p.
- CARPENTIER, J.-P., L. LACOMBE, et P. TARDIF, 1993. *Modélisation de la croissance et du rendement des pessières noires*. Dir. de la rech. for., min. de l'Énergie et des Ress., Québec. Mémoire n° 108. 236 p.
- CARPENTIER, J.-P. et P. TARDIF, 1994. *Modélisation de l'accroissement radial en forêt mélangée*. 62^e Congrès de l'ACFAS, Section des sciences forestières, Université du Québec à Montréal, mai. Résumé dans les Annales de l'ACFAS 62.
- CARPENTIER, J.-P., P. TARDIF et L. LACOMBE, 1993a. *Méthode pour déterminer un indice de qualité de station applicable aux bétulaies à bouleaux jaunes avec résineux*. Comptes rendus du Colloque international « Les modèles de croissance forestière et leurs utilisations », novembre, Centre municipal des Congrès de Québec : 125-137.
- CHEVROU, R., 1990. *La loi tronquée de Liocourt*. Ann. Sci. For. 47 : 229-239.
- CLUTTER, J.L., 1963. *Compatible growth and yield models for loblolly pine*. For. Sci. 9 : 354-371.
- CLUTTER, J.L. et F.A. BENNETT, 1965. *Diameter distribution in old-field slash pine plantations*. Georgia For. Res. Counc. Rep. 13. 9 p.
- COCHRAN, W.G., 1967. *Sampling techniques*. 3rd ed. John Wiley and Sons, New York.
- COILE, T.S. et F.X. SCHUMACHER, 1964. *Soil-site relations, stand structure, and yields of slash and loblolly pine plantations in the Southern United States*. Durham, NC. T.S. Coile Inc. 296 p.
- CURTIS, R.O., 1972. *Yield tables : past and present*. J. For. 70 : 28-32.
- CURTIS, R.O., 1976. *Growth and yield in uneven-aged stands*. Dans : Uneven-aged silviculture and management in the United States. Proceedings in Service workshops. Morgantown, West Virginia, July 15-17, 1975. Reddings, California, October 19-21, 1976. USDA, Washington, D.C. WO-24 : 186-201.
- DAGNELIE, P., J. RONDEUX, et A. THILL, 1976. *Tables dendrométriques*. Gembloux, Les Presses Agronomiques, 128 p.
- DAGNELIE, P., R. PALM, J. RONDEUX et A. THILL, 1988. *Tables de production relatives à l'Épicéa commun (Picea abies Karst.)*. Gembloux, Les Presses Agronomiques. 123 p.
- DALE, M.E. 1972. *Growth and yield predictions for upland oak stands 10 years after thinning*. USDA For. Serv. Res. Pap. NE-241. 21 p.
- DANIELS, R.F. et H.E. BURKHART, 1988. *An integrated system of forest stand models*. For. Ecol. Manag. 23 : 159-177.
- DEAL, R.L., 1987. *Development of mixed western hemlock-sitka spruce stands on the Tongass National Forest*. Unpublished Master's thesis, Univ. of Washington College of For. Res., Seattle. 116 p.
- DÉCOURT, N., 1972. *Tables de production provisoires pour l'épicéa commun dans le Nord-Est de la France*. Ann. Sci. For. 29 (1) : 48-65.
- DELVAUX, J., 1969. *Tables de production*. Bull. Soc. Roy. For. Belg. 8-9 : 361-377.
- DUPLAT, P., 1979. *Tables de production et sylviculture des résineux dans le Massif du Jura*. Off. Nat. des forêts : 8-11.
- DUPLAT, P., 1993. *Les modèles de croissance simples ne sont pas nuls mais ils ne répondent pas à tout*. Coll. intern. Nov. 1993, Centre municipal des congrès de Québec, Canada : 1-12.
- DUPLAT, P. et G. PERROTTE, 1981. *Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers*. Fontainebleau, Off. Nat. des Forêts, Section Tech. 432 p.
- EDMINSTER, C.B., 1978. *RMULD : Computation of yield tables for even-aged and two-storied stands*. USDA For. Serv., Rocky Mountain Forest and Range Exp. Stn. Res. Pap. RM-199. 26 p.

- EDMINSTER, C.B., H.T. MOWRER, R.L. MATHIASSEN, W.K. OLSEN et F.G. HAWKSWORTH, 1991. *GENGYM : a variable density stand table projection system calibrated for mixte conifers and ponderosa pine stands in the Southwest*. USDA For. Serv. Res. Pap. RM-297. 32 p.
- EDMINSTER, C.B., J.M. SCHMID et S.A. MATA, 1991. *A variable density stand table projection system calibrated for mixed conifer and Ponderosa Pine stands in the Southwest*. USDA For. Serv., Rocky Mountain For. and Range Exp. Stn. Res. Notes No. RM-509. 3 p.
- EISENHART, C., M.W. HASTAY et W.A. WALLIS, 1947. *Techniques of statistical analysis*. Statistical Res. Group, Columbia Univ. McGraw Hill, New York et Londres.
- EK, A.R., 1974. *Nonlinear models for stand table projection in Northern Hardwood stands*. Can. J. For. Res. 4 : 23-27.
- EK, A.R., E.T. MELDAHL et R.A. MONSERUD, 1976. *Instructions for implementing FOREST Version 2 on Univac, IBM and other systems*. Staff Paper Series No. 3. Dep. of For., Univ. of Wisconsin. 9 p. + fiche.
- EK, A.R. et R.A. MONSERUD, 1974. *Trials with program FOREST : growth and reproduction simulation for mixed species even- or uneven-aged forest stands*. Dans : J. Fries (éd.). Growth models and forest stand simulation. Proc. IUFRO Working Party S4.01-4 meetings, 1973. Dep. For. Yield Res., Royal Coll. For., Stockholm. Res. Notes 30 : 56-73.
- EK, A.R. et R.A. MONSERUD, 1979. *Performance and comparison of stand growth models based on individual tree and diameter class growth*. Can. J. For. Res. 9 : 231-244.
- EK, A.R. et R.A. MONSERUD, 1981. *Methodology for modeling stand dynamics*. Dans : Forest predictive models : problems in application, cooperative extension, Washington St. Univ., Pullman, WA : 19-31.
- FORTIN, J., 1983. *La croissance forestière au Québec*. Serv. de l'inv. for., min. de l'Énergie et des Res., Québec. 82 p.
- FREESE, F., 1960. *Testing accuracy*. For. Sci. 6 : 139-145.
- FROTHINGHAM, E.H., 1914. *White pine under forest management*. USDA, Bull. 13. 70 p.
- GETZ, W.M. et R.G. HAIGHT, 1989. *Population harvesting. Demographic models of fish, forest, and animal resources*. Princeton Univ. Press, Monographs in Population Biology No. 27. 392 p.
- GIBBS, C.B., 1963. *Tree diameter, a poor indicator of age in West Virginia hardwoods*. USDA For. Serv. Res. Note NE-11, 4 p. + illus.
- GLOVER, G.R. et J.N. HOOL, 1979. *A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality*. For. Sci. 25 : 275-282.
- GOULDING, C.J., 1972. *Simulation techniques for a stochastic model of the growth of Douglas fir*. Unpublished Ph.D. thesis, Univ. of British Columbia, Vancouver.
- GRONDIN, P. et al., 1995. *Manuel de foresterie*. Communication personnelle d'une section d'un document de l'O.I.F.Q. en cours de rédaction.
- HAIGHT, R.G. et W.M. GETZ, 1987. *Fixed and equilibrium endpoint problems in uneven-aged stand management*. For. Sci. 33 : 908-931.
- HAMILTON, G.J., 1988. *Forest mensuration handbook*. For. Comm. Booklet No. 39. HMSO, London. 274 p.
- HAMILTON, G.J. et J.M. CHRISTIE, 1974. *Construction and application of stand yield models*. Dans : IUFRO, S.4.01, Growth models for tree and stand simulation : 222-239.
- HANN, D.W., 1980. *Development and evaluation of an even- and uneven-aged ponderosa pine/Arizona fescue stand simulator*. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-267. 95 p.
- HANN, D.W. et D.R. LARSEN, 1990. *Diameter growth equations for fourteen tree species in southwest Oregon*. For. Res. Lab., Oregon St. Univ., Corvallis. Res. Bull. 69. 18 p.
- HARRISON, T.P. et B.R. MICHIE, 1985. *A generalized approach to the use of matrix growth models*. For. Sci. 31 (4) : 850-856.
- HILT, D.E. 1985. *OAKSIM : an individual-tree growth and yield simulator for managed, even-aged, upland oak stands*. USDA For. Serv. N.E. For. Exp. Stn. Broomall, PA. Res. Pap. NE-562. 21 p.

- HOULLIER, F., 1986. *Échantillonnage et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : application au cas de l'inventaire forestier national*. Villeurbanne, Université Claude-Bernard -Lyon 1. 300 p. (Thèse n° 3986).
- HOULLIER, F., J. BOUCHON et Y. BIROT, 1991. *Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : État et perspectives*. Rev. For. Fr. XLIII(2) : 87-107.
- HUANG, S., S.J. TITUS et D.P. WIENS, 1992. *Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species*. Can. J. For. Res. 22 (9) : 1297-1304.
- HUANG, S. et S.J. TITUS, 1993. *An index of site productivity for uneven-aged or mixed-species stands*. Can. J. For. Res. 23 : 558-562.
- HUSCH, B., H.E. BURKHART et T.W. BEERS, 1982. *Forest mensuration*. 3rd ed. Wiley, New York. 402 p.
- HYINK, D.M. 1979. *A generalized method for the projection of diameter distributions applied to uneven-aged forest stands*. Ph. D. Thesis, Purdue Univ. Cité par HUSCH et al. 1982.
- HYINK, D.M. et J.W. MOSER, Jr., 1983. *A generalized framework for projecting forest yield and stand structure using diameter distributions*. For. Sci. 29 (1) : 85-95.
- JAYARAMAN, K. et R. BAILEY, 1988. *Modelling mixed species stands with Scheffe's canonical polynomials*. Dans : Forest growth modelling and prediction. USDA, IUFRO-1987 Volume 1 : 201-208.
- KNOEBEL, B.R., H.E. BURKHART et D.E. BECK, 1986. *A growth and yield model for thinned stands of yellow-poplar (Liriodendron tulipifera L.)*. For. Sci. 32 (2) : Forest Science Monograph 27. 62 p.
- LAFOND, A. et G. LADOUCEUR, 1968. *Les groupements forestiers de la province de Québec*. Serv. de la rech., min. des Terres et Forêts, Québec. Rap. int. n° 24. 726 p.
- LASDON, L.S. et A.D. WARREN, 1986. *GREG2 user's guide*. Univ. Texas at Austin, Dep. Gen. Bus., Sch. of Bus. Admin. 60 p.
- LEAK, W.B., 1964. *An expression of diameter distribution for unbalanced, uneven-aged stands and forests*. For. Sci. 10 : 39-50.
- LEARY, R.A., 1979. *A generalized forest growth projection system applied to the Lake States region*. USDA For. Serv., Gen. Tech. Rep. NC-49. 96 p.
- LEMAY, V.M., R. GREENWOOD, P.L. MARSHALL, M. PENNER et D. WALKER, 1992. *Status of growth and yield research : 1991 joint technical session of forest measurements, tree improvement and silviculture, and forest management working groups*. For. Chron. 68(3) : 342-348.
- LEMOINE, B., 1969. *Le pin maritime dans les landes de Gascogne, objectifs et méthodes*. Ann. Sci. For. 26 : 445-473.
- LEMOINE, B., 1982. *Croissance et production du pin maritime, recherche d'un modèle et d'une méthode*. Ann. Sci. For. 39(4) : 321-354.
- LENHART, J.D. et J.L. CLUTTER, 1971. *Cubic-foot yield tables for old-field loblolly pine plantations in Georgia Piedmont*. Georgia For. Res. Council. Rep. 22, Series 3. 13 p.
- LEVINS, R., 1966. *The strategy of model building in population biology*. Am. Sci. 54 : 421-431.
- LIOCOURT, F. de, 1898. *De l'aménagement des sapinières*. Bull. Soc. For. de Franche-Comté et des provinces de l'Est, tome IV : 396-409, 645-647.
- LOWELL, K.E. et R.J. MITCHELL, 1987. *Modeling growth and mortality probabilistically using logistic regression*. USDA, IUFRO-1987. Volume 2 : 708-715.
- MARTINOT-LAGARDE, P., 1979. *Accroissement en volume des peuplements forestiers réguliers*. Off. Nat. des Forêts : 31-35.
- MCGEE, C.E. et L. DELLA-BIANCA, 1967. *Diameter distributions in natural yellow-poplar stands*. USDA For. Serv. Res. Pap. SE-25.
- MERTENS, P. et M. GENNART, 1985. *Gestion de la futaie jardinée. Un modèle simple de calcul des accroissements et de simulation de la production*. Bull. Soc. Roy. For. de Belgique : 92-3.
- MEYER, W.H., 1929. *Yield of second-growth spruce and fir in the northeast*. USDA For. Serv. North East. For. Exp. Stn. Tech. Bull. No. 142. 52 p.

- MEYER, H.A., 1953. *Forest mensuration*. Penns Valley Publ. Inc., State College, Penn. 357 p.
- MICHIE, B.R., 1985. *Uneven-aged stand management and the value of forest land*. For. Sci. 31 : 116-121.
- MINER, C.L. et N.R. WALTERS, 1984. STEMS : *A non-technical description for foresters*. USDA For. Serv. North. Cent. For. Exp. Stn., St. Paul, MN. Res. Pap. NC-252. 12 p.
- MINER, C.L., N.R. WALTERS et M.L. BELLI, 1988. *A guide to the TWIGS program for the north central United States*. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. NC-125. 105 p.
- MITCHELL, K.J., H. OSWALD et J.M. OTTORINI, 1983. *Modeling the growth of Douglas fir in France*. IUFRO, Vienne, 1982.
- MOSER, J.W., Jr. 1972. *Dynamics of an uneven-aged forest stand*. For. Sci. 18 : 184-191.
- MOSER, J.W., Jr., 1974. *A system of equations for the components of forest growth*. Dans : Fries, J. (éd.). Growth models for trees and stands simulations. Proceedings of 1973 meetings of IUFRO. Royal Coll. of For., Stockholm. 179 p.
- MOSER, J.W., Jr. et O.F. HALL, 1969. *Deriving growth and yield function for unevenaged forest stands*. For. Sci. 15 : 183-188.
- MUNRO, D.D., 1974. *Forest growth models, a prognosis*. Dans : Fries J.(éd.). Growth models for tree and stand simulation. Royal Coll. of For., Stockholm. Res. Notes No. 30 : 7-21.
- OLIVER, C.D., 1978. *Development of northern red oak in mixed species stands in central New England*. Yale Univ., School of For. and Env., St. Bull. No. 91. 63 p.
- OLIVER, C.D. et B.C. LARSON, 1990. *Forest stand dynamics*. New York, McGraw-Hill. 467 p.
- PALM, R., 1988. *Tables de production de l'épicéa : étude de la répartition des nombres d'arbres et des volumes par catégories de circonférences*. Bull. Soc. Roy. For. de Belgique 88(2) : 66-73.
- PARDÉ, J. et J. BOUCHON, 1988. *Dendrométrie*. 2^e éd. ENGREF, Nancy. 328 p.
- PEDEN, L.M., J.S. WILLIAMS et W.E. FRAYER, 1973. *A Markov model for stand projection*. For. Sci. 19 : 303-314.
- PERRON, J.-Y., 1983. *Tarif de cubage général. Volume marchand brut*. Serv. de l'inv. for., min. de l'Énergie et des Ress., Québec. 52 p.
- PERRON, J.-Y., N.R. MONGER, J.-P. SAUCIER, P. BERGER et A. ROBITAILLE, 1994a. *Normes d'inventaire forestier (provisoire). Les placettes-échantillons temporaires*. Serv. des inv. for., min. des Ress. nat., Québec. 186 p.
- PERRON, J.-Y., N.R. MONGER, J.-P. SAUCIER, P. BERGER et A. ROBITAILLE, 1994b. *Normes d'inventaire forestier (provisoire). Les placettes-échantillons permanentes*. Serv. des inv. for., min. des Ress. nat., Québec. 234 p.
- PIENAAR, L.V., 1966. *A non-linear biomathematical model for even-aged plantations*. Forestry in South Africa 7 : 117-124.
- PIENAAR, L.V. et W.M. HARRISON, 1988. *A stand table projection approach to yield prediction in unthinned even-aged stands*. For. Sci. 34(3) : 804-808.
- PLONSKI, W.L., 1981. *Normal yield tables for black spruce, jack pine, aspen, white birch, tolerant hardwoods, white pine and red pine*. Ont. Dept. of Lands and For. 39 p.
- PRETZSCH, H., 1990. *Modeling the growth of pure and mixed stands on the data base of long term experimental plots*. IUFRO. 20 p.
- QUICKE, H.E., R.S. MELDAHL et J.S. KUSH, 1994. *Basal area growth of individual trees : a model derived from a regional longleaf pine growth study*. For. Sci. 40(3) : 528-542.
- REYNOLDS, M.R., 1984. *Estimating the error in model predictions*. For. Sci. 30 : 454-469.
- RICHARDS, F.J., 1959. *A Flexible Growth Function for Empirical Use*. J. of Exp. Botany 10(29) : 290-300.
- RONDEUX, J., 1993. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Les Presses agr. de Gembloux (Belgique). 521 p.
- SCHUMACHER, F.X. et T.S. COILE, 1960. *Growth and yield of natural stands of the Southern pines*. T.S. Coile Inc., Durham, NC. 115 p.

- SCHUTZ, J.-Ph. et E. BADOUX, 1979. *Production de jeunes peuplements de chênes en relation avec la station*. Mém. : BD./Vol. 55 heft/fasc.1, IFRF Birmensdorf, Suisse. 176 p.
- SCOTT, T.C. et N.G. VOORHIS, 1986. *Northeastern forest survey site index equation and site productivity classes*. North. J. Appl. For. 3 : 144-148.
- SHIFLEY, S.R., MOSER, J.W. et BROWN, K.M., 1982. *Growth and yield models for the elm-ash-cottonwood type in Indiana*. USDA For. Serv. Res. Pap. NC-218. 16 p.
- SHIFLEY, S.R., EK, A.R. et BURK, T.E., 1993. *A generalized methodology for estimating forest ingrowth at multiple threshold diameters*. For. Sci. 39 : 776-798.
- SHUGART, H., 1984. *A theory of forest dynamics (The ecological implications of forest succession models)*. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo. 278 p.
- SHUGART, H.H., Jr. et D.C. WEST, 1980. *Forest succession models*. BioSci. 30(5) : 308-313.
- SKEEN, J.N., 1981. *The pattern of natural regeneration and height stratification within a naturally-created opening in an all-aged Piedmont deciduous forest*. Dans : First Biennial Southern Silv. Res. Conf. Proc., USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. SO-34 : 259-268.
- SOLOMON, D.S., R.A. HOSMER et H.T. HAYSLETT Jr., 1986. *A two-stage matrix model for predicting growth of forest stands in the Northeast*. Can. J. For. Res. 16(3) : 521-528.
- SOMERS, G.L. et R.M. FARRAR, Jr., 1991. *Biomathematical growth equations for natural longleaf pine stands*. For. Sci. 37(1) : 227-244.
- SPURR, S.H., 1952. *Forestry inventory*. The Ronald Company, New York. 476 p.
- STAGE, R.A., 1973. *Prognosis models for stand development*. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-137.
- STEPHENS, G.R. et P.E. WAGGONER, 1970. *The forests anticipated from 40 years of natural transitions in mixed hardwoods*. Connecticut Agric. Exp. St. Bull. No. 707. 58 p.
- STIFF, C.T., 1979. *Modelling the growth dynamics of natural mixed-species appalachian hardwood stands*. Ph.D. dissertation, Blacksburg, Virginia. 206 p.
- SULLIVAN, A.D. et J.L. CLUTTER, 1972. *A simultaneous growth and yield model for loblolly pine*. For. Sci. 18 : 76-86.
- TECK, R. et D.E. HILT, 1991. *Individual-tree diameter growth model for the Northeastern United States*. USDA For. Serv. NE-649.
- TESSIER, G., 1948. *La relation d'allométrie, sa signification statistique et biologique*. Biometrics 4(1) : 14-53.
- THIBAUT, M., 1985. *Carte des régions écologiques. 2^e approximation*. Serv. de la rech. for. et Serv. de la carto., min. de l'Énergie et des Ress., Québec. Carte au 1 : 1 250 000.
- TILLMAN, D.A. et E.C. JAHN, éditeurs, 1983. *Progress in biomass conversion. Volume 4*. Academic Press. xii + 308 p.
- TURNBULL, K.J., 1963. *Population dynamics in mixed forest stands. A system of mathematical models of mixed stand growth and structure*. Ph.D. Thesis, Univ. of Washington. 187 p.
- UNG, C.H., J. BEAULIEU, et D. DEMERS, 1982. *Modèle de prédiction des essences feuillues et résineuses du Québec*. Can. J. For. Res. 12(2) : 232-239.
- VANCLAY, J.K., 1991. *Compatible deterministic and stochastic predictions by probabilistic modelling of individual trees*. For. Sci. 37(6) : 1656-1663.
- VANCLAY, J.K., 1994. *Modelling forest growth and yield, applications to mixed tropical forests*. Dep. of Econ. and Nat. Res., Royal Vet. and Agric. Univ., Copenhagen. 312 p.
- VÉZINA, P.-É. et A. LINTEAU, 1968. *Growth and yield of balsam fir and black spruce in Québec*. Can. Dept. For., Rural Div., For. Res. Lab. Inf. Rep. No. Q-X-2.
- WALTERS, J.W., T.E. HINDS, D.W. JOHNSON et J. BEATTY, 1982. *Effects of partial clearing on diseases, mortality and regeneration of Rocky Mountain aspen stands*. USDA For. Serv., Res. Pap. RM-240. 12 p.

- WEST, P.W., 1980. *Use of diameter and basal area increment in tree growth studies*. Can. J. For. Res. 10 : 71-77.
- WILSON, C.V., 1971. *Le climat du Québec, partie 1 : atlas climatique*. Serv. météor. du Canada, Études climatologiques, 11. 44 figures.
- WOOD, O.M., 1939. *Persistence of stems per sprout clump in oak coppice stands of southern New Jersey*. J. of For. 37 : 269-270.
- WYKOFF, W.R., N.L. CROOKSTON et A.R. STAGE, 1982. *User's Guide to the stand prognosis model*. USDA For. Serv., Intermountain Forest and Range Exp. Stn., Ogden, UT. Gen. Tech. Rep. INT-133. 112 p.

Les aménagistes forestiers doivent pouvoir prédire le rendement et la croissance des divers peuplements. Leur outil de prédiction est la table de production. Dans le but de mieux adapter cet outil à la réalité des forêts du Québec, le ministère des Ressources naturelles, par sa Direction de la recherche forestière, mène divers travaux portant sur cet aspect de la connaissance de la forêt. Des modèles mathématiques sont élaborés pour prédire l'évolution dendrométrique de chaque type de peuplement. La possibilité forestière étant définie plus exactement, on évitera à la fois la sous-utilisation du capital forestier, qui conduit à une perte de matière ligneuse, et la sur-utilisation, qui entraîne des ruptures de stock.



Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources
naturelles

ISBN 2-550-30232-X
ISSN 1183-3912
F.D.C. 561 + 566(047.3)(714)
L.C. SD 387 .Y44

RN96-3064

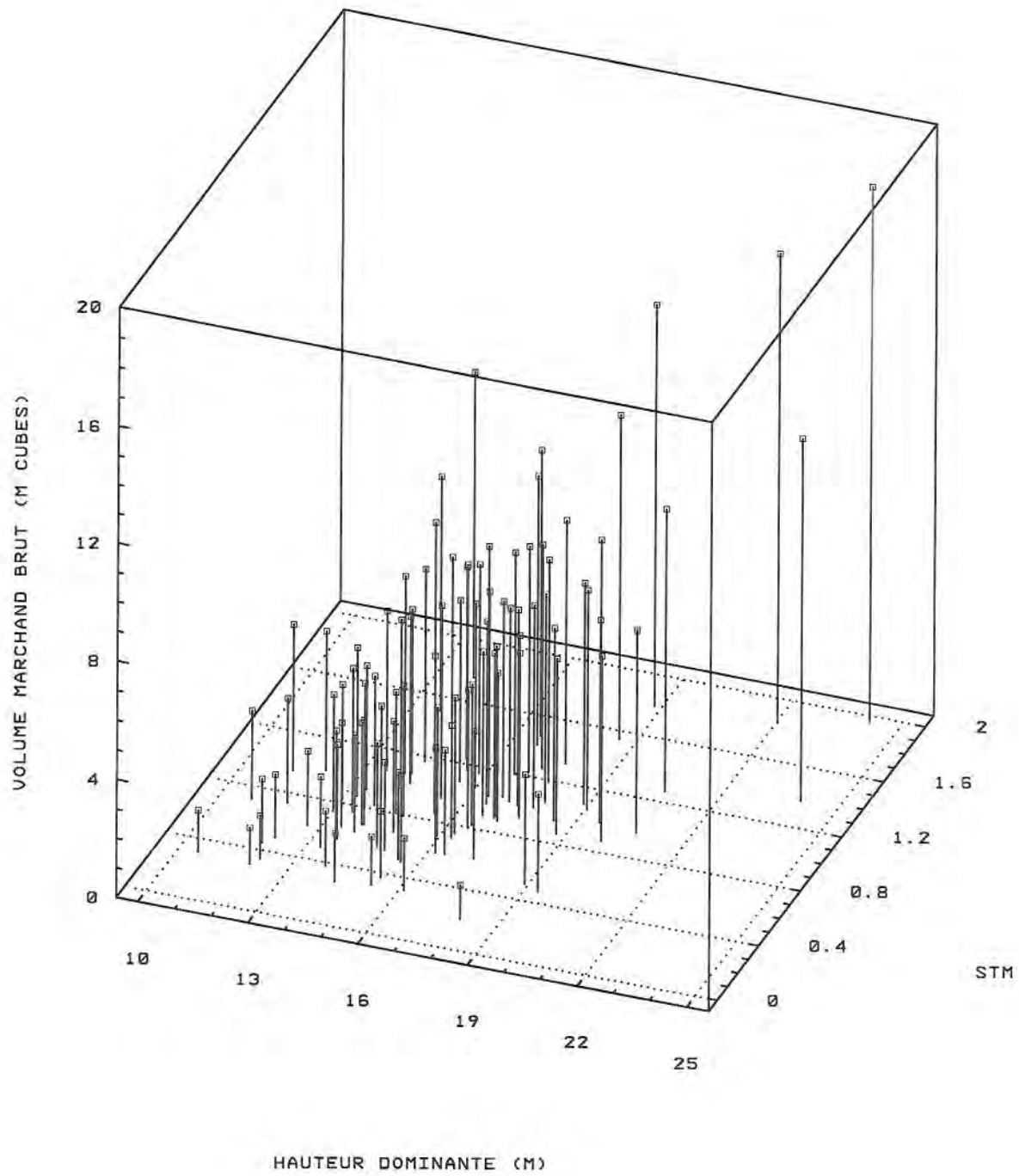


Figure 3.26. Volume marchand brut observé par placette en fonction de la surface terrière marchande et de la hauteur dominante.

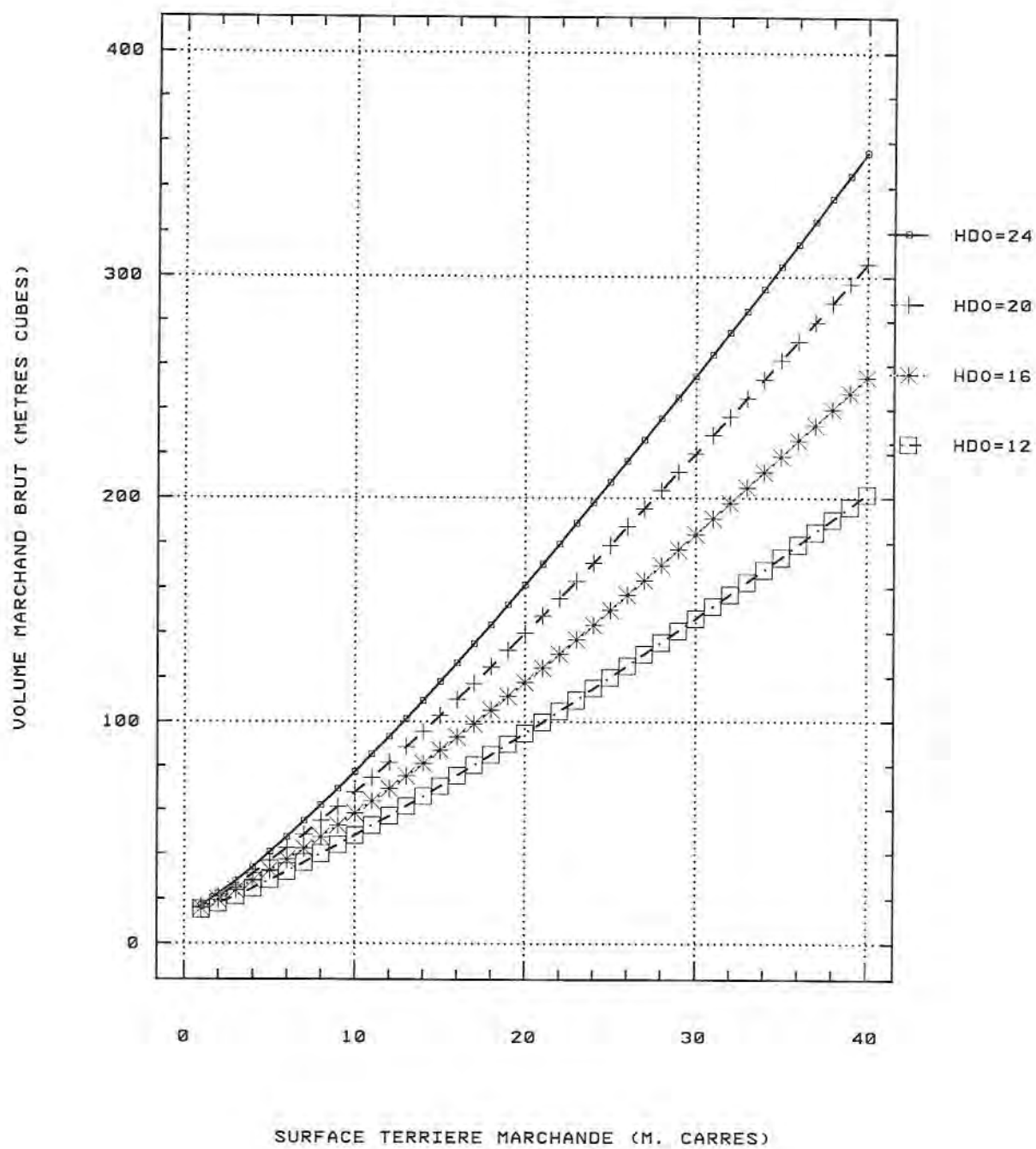


Figure 3.27. Volume marchand brut par hectare en fonction de la surface terrière marchande lorsque la hauteur dominante est fixée à quatre niveaux différents.

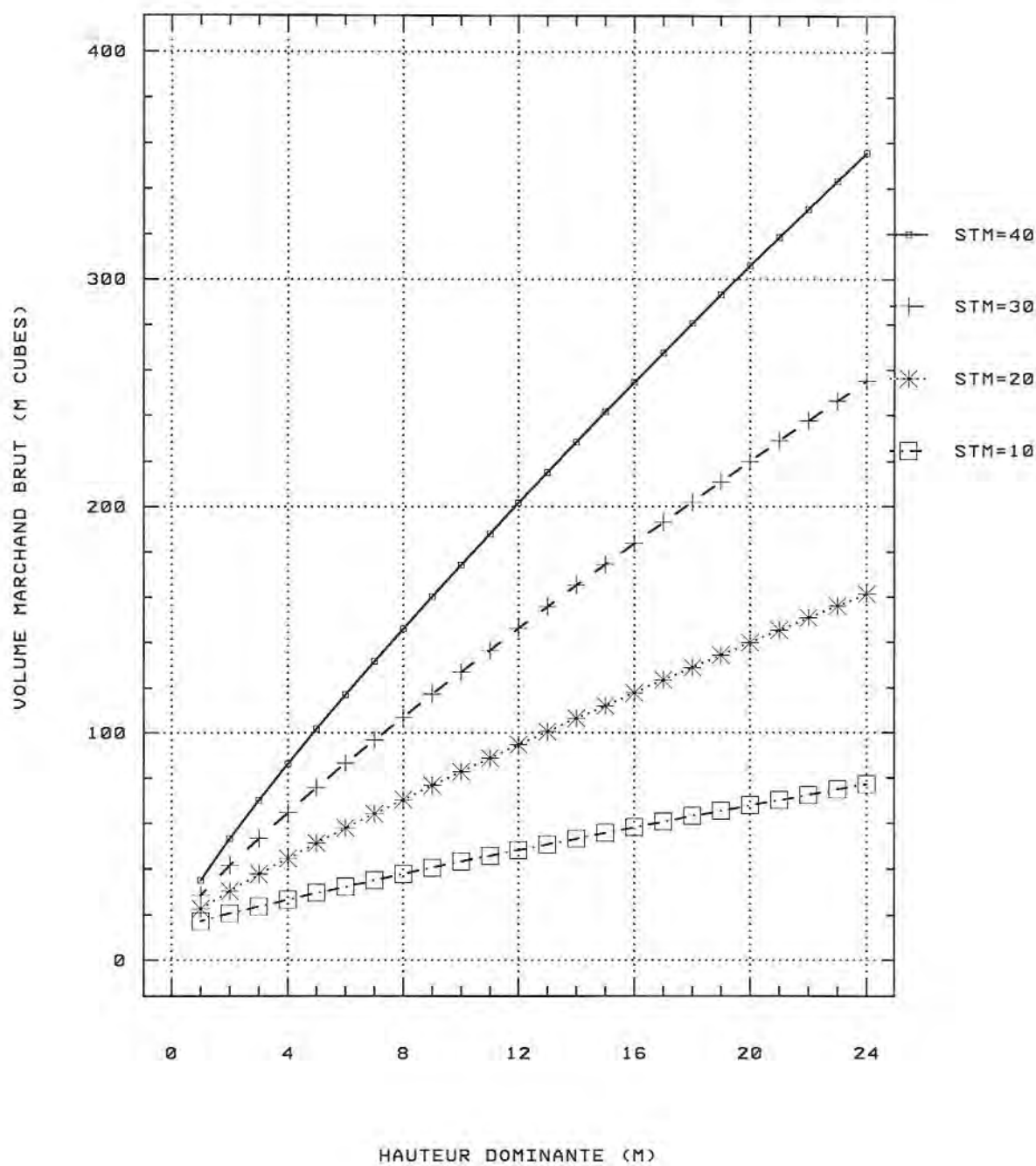


Figure 3.28. Volume marchand brut par hectare en fonction de la hauteur dominante lorsque la surface terrière marchande est fixée à quatre niveaux différents.

Tableau 3.17 Rapport du volume marchand brut sur la surface terrière marchande (VMB/STM) en fonction de la hauteur dominante pour la bétulaie jaune à résineux

HAUTEUR DOMINANTE (M)	RAPPORT (VMB/STM)
4	2.08
5	2.41
6	2.74
7	3.06
8	3.39
9	3.72
10	4.04
11	4.37
12	4.70
13	5.02
14	5.35
15	5.68
16	6.00
17	6.33
18	6.66
19	6.98
20	7.31
21	7.64
22	7.96
23	8.29
24	8.62
25	8.94
26	9.27
27	9.60
28	9.93
29	10.25

Chapitre quatre

Phénomène du recrutement

Dans un peuplement forestier, on trouve toujours une distribution de tiges par classe de DHP. Dans les peuplements inéquiennes, cette distribution a souvent la forme d'un « J » inversé, tandis que dans les peuplements équiennes jeunes, on retrouve un plus grand nombre de tiges localisées uniquement dans les classes inférieures de DHP. Généralement dans les peuplements équiennes mûrs, le nombre de tiges par classe de DHP se rapproche davantage d'une distribution normale. On retrouve des tiges sur une beaucoup plus grande gamme de classes de DHP avec une concentration de tiges dans les classes situées près du DHP moyen. Il y a donc une évolution dans la distribution puisque le DHP moyen varie dans le temps.

Étant donné qu'une norme minimale (seuil d'échantillonnage) doit être fixée pour définir si une tige est marchande et que la majorité des tiges croissent en diamètre, on assiste au phénomène du recrutement. Toutes les nouvelles tiges vivantes qui ont dépassé le seuil lors d'une mesure donnée peuvent être considérées comme des recrues. Ainsi, uniquement les tiges qui dépassent pour la première fois le seuil de 9 cm sont considérées comme des recrues. Dans le modèle *BOJRES*, ce seuil devient la limite inférieure pour classer un arbre comme une recrue.

4.1 Place occupée par les recrues dans la modélisation

Les changements que subissent les peuplements forestiers peuvent être distingués en quatre composantes : le recrutement, l'accroissement des survivants, la mortalité et la récolte (Beers 1962). Par récolte, on entend les éclaircies qui récupèrent la mortalité potentielle. Plusieurs modèles de dynamique forestière estiment ces composantes

séparément. Parmi toutes ces composantes, le recrutement demeure celle qui reçoit le moins d'attention. Plusieurs systèmes de prédiction de la croissance, grandement utilisés en Amérique du nord, n'estiment même pas le nombre de recrues. Conséquemment, ces systèmes peuvent être utilisés uniquement là où les recrues ne sont pas assez nombreuses pour avoir un effet significativement important ou lorsque l'utilisateur accepte un élément d'erreur résultant de l'omission volontaire de l'arrivée des recrues.

4.1.1 Définition du phénomène du recrutement

Le phénomène du recrutement se quantifie comme le nombre ou le volume d'arbres qui atteignent périodiquement la plus petite classe de DHP recensée d'un peuplement forestier (Beers 1962). La définition exacte dépend de la dimension de la plus petite classe prise en compte par le plan d'échantillonnage. Dans le but de limiter les frais de sondage, on ne mesure habituellement que les arbres plus gros en DHP qu'un certain seuil d'échantillonnage. Au centre-nord des États-Unis, ce seuil se situe toujours entre un et onze pouces (2,5 et 28 cm) (Shifley *et al.* 1993). Au Québec, dans le cas des placettes temporaires, la plus petite classe de DHP considérée est celle des 10 cm. Cette classe, comme toutes les autres, possède une amplitude de 2 cm. Dans le cas des placettes permanentes, le seuil est défini avec une unité de mesure plus fine, soit 90 mm.

4.1.2 Travaux antérieurs sur le phénomène du recrutement

Cette synthèse des travaux de recherche américains vise surtout l'estimation de l'arrivée d'un certain nombre de recrues dans un contexte de modélisation de la croissance et de la production forestière. Quelques exemples de modèles de croissance et de production qui furent développés pour le centre-nord

Tableau 4.1 Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence BOJ

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
10	86	41	0.567	30	9	0.374	1	1	1.898	117	51	0.529
12	65	14	0.256	26	4	0.192	0	0	0.000	91	18	0.238
14	54	4	0.088	28	0	0.000	1	0	0.000	83	4	0.057
16	49	0	0.000	14	0	0.000	2	0	0.000	65	0	0.000
18	49	0	0.000	14	0	0.000	0	0	0.000	63	0	0.000
20	50	0	0.000	16	0	0.000	0	0	0.000	66	0	0.000
22	41	0	0.000	19	0	0.000	0	0	0.000	60	0	0.000
24	41	0	0.000	15	0	0.000	3	0	0.000	59	0	0.000
26	21	0	0.000	13	0	0.000	2	0	0.000	36	0	0.000
28	34	0	0.000	8	0	0.000	0	0	0.000	42	0	0.000
30	26	0	0.000	11	0	0.000	0	0	0.000	37	0	0.000
32	25	0	0.000	6	0	0.000	2	0	0.000	33	0	0.000
34	26	0	0.000	11	0	0.000	1	0	0.000	38	0	0.000
36	18	0	0.000	7	0	0.000	2	0	0.000	27	0	0.000
38	12	0	0.000	4	0	0.000	1	0	0.000	17	0	0.000
40	73	0	0.000	23	0	0.000	2	0	0.000	98	0	0.000
TOTAL	670	59	0.105	245	13	0.066	17	1	0.112	932	73	0.095

Tableau 4.2 Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence BOP

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
10	37	22	0.690	7	3	0.553	0	0	0.000	44	25	0.668
12	23	17	0.857	7	1	0.184	0	0	0.000	30	18	0.700
14	29	2	0.080	8	0	0.000	0	0	0.000	37	2	0.063
16	21	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	24	0	0.000
18	16	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	20	0	0.000
20	15	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	19	0	0.000
22	7	0	0.000	6	0	0.000	0	0	0.000	13	0	0.000
24	4	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	8	0	0.000
26	2	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
28	3	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
30	2	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
32	3	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
34	0	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
36	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
38	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
40	5	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	6	0	0.000
TOTAL	168	41	0.283	47	4	0.110	0	0	0.000	215	45	0.245

des États-Unis sont : *STEMS/TWIGS* (Belcher *et al.* 1982, Miner et Walters 1984, Miner *et al.* 1988), *OAK-SIM* (Hilt 1985), *SMPS* (Moser 1974), *GROAK* (Dale 1972) et *SHAF* (Adams et Ek 1975). Ces modèles sont différents des modèles de succession (appelés « *Gap and Succession models* ») qui ont été développés principalement dans le but de prédire et d'étudier la dynamique forestière à long terme (plus long qu'une rotation). Dans notre cas, nous nous limiterons à des modèles pour un terme plus court.

Moser (1972, 1974) and Ek (1974) sont les pionniers de la modélisation à composantes multiples pour la prédiction de la croissance et de la production d'un peuplement. En utilisant, entre autres, un sous-modèle séparé pour modéliser le phénomène du recrutement, ces deux auteurs ont prédit le nombre périodique de recrues en fonction du nombre d'arbres et de la surface terrière par acre des arbres plus gros que le seuil d'échantillonnage. Ces travaux ont été réalisés en peuplements composés de feuillus nordiques (*northern hardwood stands*). Dans leurs travaux, Moser et Ek ont conclu que le nombre de recrues augmente lorsque la surface terrière à l'acre diminue. Ce nombre augmente également lorsque le nombre d'arbres à l'acre augmente et que la grosseur moyenne des arbres du peuplement diminue. Ces conclusions semblent logiques. En effet, lors de l'installation d'un nouveau peuplement, il y a très peu de tiges ayant passé le seuil de recrutement. À mesure que le temps avance, le nombre de celles qui le franchissent est en augmentation; la surface terrière et le DHP moyen sont encore faibles. Shifley *et al.* (1982) ont obtenu des résultats semblables à l'intérieur de peuplements composés d'orme, de frêne et de peuplier (*elm-ash-cottonwood stands*) dans l'état d'Indiana. Ek (1974), par ailleurs, n'a pas trouvé de relation significative entre l'indice de qualité de station (IQS) et le nombre de recrues. Par contre, Hann (1980) a développé un modèle pour la prédiction des recrues en fonction des indices de qualité de station et de la surface terrière des arbres ayant trois pouces (7,6 cm) de plus en diamètre que le seuil d'inventaire. Ce dernier a effectué ses travaux sur le pin ponderosa (*Pinus ponderosa* L.). Le modèle de Hann prédit une augmentation des recrues lorsque l'indice de qualité de station est élevé, mais il a noté que son modèle initial avait besoin de modification parce que le signe du coefficient de la variable explicative IQS était à l'opposé de celui qu'il prévoyait.

Burk (1978) a développé un modèle pour prédire le nombre de recrues dans les peuplements de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) croissant dans la région des Grands-Lacs. La variable dépendante de son modèle était le nombre de recrues,

exprimé comme un pourcentage des arbres sur pied ayant un diamètre de cinq pouces (12,7 cm) au-dessus du seuil d'inventaire. Contrairement aux autres modèles de prédiction de recrues mentionnés dans cette section, le modèle de Burk utilisait le pourcentage de *stocking* explicitement comme variable de prédiction pour les recrues.

Le modèle par distribution diamétrale d'Hyink et Moser (1983) appliqué à des peuplements inéquiennes de feuillus nordiques inclut un sous-modèle pour prédire l'arrivée du nombre de recrues par acre en fonction du nombre et de la somme des diamètres de tous les arbres ayant un DHP supérieur à sept pouces (17,8 cm). Dans leur cas, cette dimension représentait le seuil de recrutement. Stiff (1979), dans un modèle de distribution des tiges par classe de diamètre appliqué aux peuplements mixtes de feuillus nordiques des Appalaches, a estimé le nombre de recrues à un seuil de recrutement de cinq pouces de DHP (12,7 cm) en fonction du nombre et de la surface terrière des arbres ayant un DHP supérieur au seuil de recrutement. Hyink (1979) et Stiff (1979) font remarquer que le paramètre de forme dans la fonction de densité pour la loi de Weibull, utilisée pour décrire la distribution des diamètres, était fortement relié au nombre de recrues. Ils ont alors utilisé le nombre de recrues comme variable indépendante dans un modèle pour prédire la valeur du paramètre de forme de la distribution de Weibull.

Le modèle *FOREST* (Ek et Monserud 1974, Ek *et al.* 1976) constitue un modèle de croissance et de production basé sur l'« arbre individuel ». Il prédit, entre autres, le nombre de recrues ainsi que l'essence de celles-ci. Il considère comme recrues, les tiges qui dépassent 4,5 *pièdes* (1,3 m) de hauteur. L'estimation du nombre de recrues est basée sur la qualité et la composition en essences des sources de semences. La qualité et la composition en essences des semences dépendent en partie de la grosseur, de l'âge et de l'essence des arbres de la strate supérieure.

4.2 Détermination des taux de recrutement observés dans les placettes permanentes

Une fonction *APL* nommée *CRECRU2CM* a été conçue dans le but de calculer les taux de recrutement décennaux par classe de DHP pour l'ensemble des placettes de bouleau jaune à résineux pour chacune des dix essences principales composant ces peuplements. Cette fonction, qui est présentée dans un rapport interne de la DRF (Carpentier 1995), prépare les tableaux 4.1 à 4.12. Les taux décennaux sont calculés sur les trois périodes de croissance comprises entre la mesure 1 et la mesure 4. Ces taux sont calculés en divisant le nombre de tiges recrues observées au

Tableau 4.3 Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence ERS

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
10	19	16	1.068	12	9	0.697	0	0	0.000	31	25	0.925
12	13	2	0.195	7	4	0.531	0	0	0.000	20	6	0.313
14	9	0	0.000	5	0	0.000	0	0	0.000	14	0	0.000
16	4	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	8	0	0.000
18	7	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	9	0	0.000
20	6	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	7	0	0.000
22	4	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	5	0	0.000
24	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
26	2	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
28	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
30	3	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
32	3	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
34	3	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	5	0	0.000
36	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
38	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
40	4	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	5	0	0.000
TOTAL	80	18	0.285	38	13	0.318	0	0	0.000	118	31	0.296

Tableau 4.4 Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence ERR

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
10	30	22	0.895	14	7	0.661	1	0	0.000	45	29	0.802
12	20	5	0.305	11	0	0.000	5	0	0.000	36	5	0.169
14	21	0	0.000	7	0	0.000	4	0	0.000	32	0	0.000
16	20	0	0.000	11	1	0.120	0	0	0.000	31	1	0.043
18	11	0	0.000	6	0	0.000	1	0	0.000	18	0	0.000
20	5	0	0.000	4	0	0.000	1	0	0.000	10	0	0.000
22	6	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	9	0	0.000
24	3	0	0.000	1	0	0.000	4	0	0.000	8	0	0.000
26	3	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
28	2	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
30	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
32	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
34	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
36	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
38	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
40	3	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
TOTAL	126	27	0.261	59	8	0.179	16	0	0.000	201	35	0.217

Tableau 4.5 Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence PRP

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
10	10	13	1.441	5	4	1.706	0	0	0.000	15	17	1.529
12	8	7	0.970	6	0	0.000	0	0	0.000	14	7	0.554
14	4	1	0.277	0	0	0.000	0	0	0.000	4	1	0.277
16	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
18	0	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
20	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
22	2	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
24	0	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
26	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
28	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
30	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
32	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
34	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
36	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
38	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
40	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
TOTAL	25	21	0.931	13	4	0.656	0	0	0.000	38	25	0.837

Tableau 4.6 Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence SAB

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
10	249	111	0.510	50	15	0.411	7	1	0.452	306	127	0.492
12	180	26	0.165	38	7	0.253	5	0	0.000	223	33	0.176
14	131	2	0.017	45	0	0.000	5	0	0.000	181	2	0.013
16	90	2	0.025	23	0	0.000	1	0	0.000	114	2	0.020
18	80	0	0.000	18	0	0.000	4	0	0.000	102	0	0.000
20	66	0	0.000	26	0	0.000	1	0	0.000	93	0	0.000
22	37	0	0.000	19	0	0.000	2	0	0.000	58	0	0.000
24	34	0	0.000	13	0	0.000	0	0	0.000	47	0	0.000
26	19	0	0.000	11	0	0.000	1	0	0.000	31	0	0.000
28	18	0	0.000	7	0	0.000	0	0	0.000	25	0	0.000
30	9	0	0.000	7	0	0.000	0	0	0.000	16	0	0.000
32	5	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	7	0	0.000
34	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
36	0	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
38	0	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
40	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
TOTAL	920	141	0.175	261	22	0.116	26	1	0.122	1207	164	0.161

Tableau 4.7 Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence EPB

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
10	25	6	0.299	1	1	1.315	0	0	0.000	26	7	0.338
12	17	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	20	0	0.000
14	6	1	0.208	3	0	0.000	0	0	0.000	9	1	0.138
16	7	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	7	0	0.000
18	7	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	8	0	0.000
20	7	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	7	0	0.000
22	8	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	10	0	0.000
24	10	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	10	0	0.000
26	5	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	7	0	0.000
28	1	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
30	6	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	7	0	0.000
32	2	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
34	3	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	6	0	0.000
36	5	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	6	0	0.000
38	2	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	5	0	0.000
40	9	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	13	0	0.000
TOTAL	120	7	0.073	26	1	0.051	0	0	0.000	146	8	0.069

Tableau 4.8 Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence EPR

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
10	14	6	0.420	5	1	0.249	0	0	0.000	19	7	0.375
12	5	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	7	0	0.000
14	13	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	17	0	0.000
16	3	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	7	0	0.000
18	5	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	6	0	0.000
20	2	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
22	3	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
24	5	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	8	0	0.000
26	5	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	5	0	0.000
28	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
30	0	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
32	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
34	2	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
36	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
38	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
40	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
TOTAL	59	6	0.100	21	1	0.059	0	0	0.000	80	7	0.089

Tableau 4.9 Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence THO

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
10	20	14	0.960	1	2	1.749	0	0	0.000	21	16	0.997
12	27	1	0.051	1	0	0.000	0	0	0.000	28	1	0.049
14	14	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	14	0	0.000
16	16	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	16	0	0.000
18	15	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	18	0	0.000
20	23	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	26	0	0.000
22	9	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	13	0	0.000
24	9	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	11	0	0.000
26	15	0	0.000	6	0	0.000	0	0	0.000	21	0	0.000
28	9	0	0.000	4	0	0.000	1	0	0.000	14	0	0.000
30	11	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	13	0	0.000
32	8	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	11	0	0.000
34	8	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	9	0	0.000
36	7	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	8	0	0.000
38	2	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
40	20	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	23	0	0.000
TOTAL	213	15	0.097	34	2	0.051	1	0	0.000	248	17	0.090

Tableau 4.10 Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour l'essence PRU

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
10	13	3	0.298	5	4	0.791	0	0	0.000	18	7	0.435
12	6	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	10	0	0.000
14	2	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
16	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
18	3	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
20	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
22	4	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
24	2	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	5	0	0.000
26	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
28	2	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
30	2	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
32	2	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
34	4	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	5	0	0.000
36	3	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	5	0	0.000
38	0	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
40	17	0	0.000	6	0	0.000	0	0	0.000	23	0	0.000
TOTAL	63	3	0.061	31	4	0.128	0	0	0.000	94	7	0.083

Tableau 4.11 Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour les essences résineuses

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
10	13	3	0.298	5	4	0.791	0	0	0.000	18	7	0.435
12	6	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	10	0	0.000
14	2	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
16	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
18	3	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
20	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
22	4	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
24	2	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	5	0	0.000
26	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
28	2	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
30	2	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
32	2	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
34	4	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	5	0	0.000
36	3	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	5	0	0.000
38	0	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
40	17	0	0.000	6	0	0.000	0	0	0.000	23	0	0.000
TOTAL	1375	172	0.146	373	30	0.103	27	1	0.117	1775	203	0.136

Tableau 4.12 Détermination du taux de recrutement décennal par période et par classe de DHP pour les essences feuillues

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
10	321	140	0.509	62	23	0.465	7	1	0.452	390	164	0.501
12	235	27	0.132	48	7	0.200	5	0	0.000	288	34	0.141
14	166	3	0.021	54	0	0.000	5	0	0.000	225	3	0.016
16	117	2	0.020	28	0	0.000	1	0	0.000	146	2	0.016
18	110	0	0.000	24	0	0.000	4	0	0.000	138	0	0.000
20	99	0	0.000	31	0	0.000	1	0	0.000	131	0	0.000
22	61	0	0.000	25	0	0.000	2	0	0.000	88	0	0.000
24	60	0	0.000	21	0	0.000	0	0	0.000	81	0	0.000
26	45	0	0.000	20	0	0.000	1	0	0.000	66	0	0.000
28	30	0	0.000	13	0	0.000	1	0	0.000	44	0	0.000
30	28	0	0.000	12	0	0.000	0	0	0.000	40	0	0.000
32	17	0	0.000	7	0	0.000	0	0	0.000	24	0	0.000
34	18	0	0.000	5	0	0.000	0	0	0.000	23	0	0.000
36	16	0	0.000	5	0	0.000	0	0	0.000	21	0	0.000
38	4	0	0.000	5	0	0.000	0	0	0.000	9	0	0.000
40	48	0	0.000	13	0	0.000	0	0	0.000	61	0	0.000
TOTAL	1069	166	0.184	402	42	0.131	33	1	0.058	1504	209	0.167

temps final par le nombre de tiges vivantes observées au temps initial, pour chacune des classes de diamètre. Ces taux, par classe de DHP, réfèrent au nombre de tiges vivantes dans la classe au début de la période d'observation. Ces taux périodiques sont ajustés par le nombre d'années écoulées entre les mesures respectives par interpolation linéaire et sont rapportés en taux décennaux. Ces résultats sont présentés dans les tableaux 4.1 à 4.10. Dans ces tableaux, les abréviations VIV. et REC. signifient respectivement le nombre de tiges vivantes et le nombre de tiges recrutées. Pour chacune des classes de diamètre, les taux de recrutement décennaux ont été calculés pour les périodes comprises entre les mesures un et deux, deux et trois, ainsi que trois et quatre. Seule la période 1-2 s'échelonnant entre les mesures un et deux compte suffisamment de tiges recrutées et de tiges vivantes pour que les taux soient utilisables. La période théorique 1-4 est le résultat d'une sommation pondérée des périodes réelles 1-2, 2-3 et 3-4. Celle-ci est intéressante car elle résume toutes les précédentes. C'est, en effet, de cette période que l'on tire le plus d'informations pertinentes; on en discutera dans les prochains paragraphes.

Les tableaux 4.11 et 4.12 résument l'ensemble de cette analyse descriptive. D'après ces données, la cohorte feuillue possède un taux de recrutement légèrement supérieur à celui des résineux. Cette différence peut s'expliquer par plusieurs raisons dont la principale est la présence du cerisier de Pennsylvanie (*Prunus pensylvanica* L. f.) parmi la cohorte feuillue. Cette essence pionnière est caractérisée par un fort taux de recrutement presque trois fois supérieur à tout autre essence retrouvée dans les peuplements de bouleau jaune à résineux. Le cerisier de Pennsylvanie, étant une essence intolérante, profite pleinement de la lumière qui se rend au sol dans les trouées. Ces trouées apparaissent lorsqu'un vieux bouleau jaune meurt, ou tout simplement lorsque des individus de la cohorte résineuse sont affectés par la tordeuse ou par un chablis. Dans cette optique, on pourrait croire que les bétulaies jaunes à résineux étudiées se transformeraient en peuplements de cerisier de Pennsylvanie avec le temps. Cette transformation ne survient pas puisque le cerisier de Pennsylvanie a une faible espérance de vie. Une autre raison explique la supériorité du recrutement feuillu par rapport au recrutement résineux : parmi la cohorte feuillue, on compte plus d'essences tolérantes à l'ombre (érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) et érable rouge (*Acer rubrum* L.) que parmi la cohorte résineuse. Les jeunes tiges d'érables survivent mieux à l'ombre, elles augmentent ainsi le taux de recrutement global des feuillus.

Le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.), tout comme le cerisier de Pennsylvanie, s'installe dans des placettes où la densité est faible et augmente le taux de recrutement des feuillus mais de façon beaucoup moins forte puisque son taux est moins du tiers de celui du cerisier de Pennsylvanie. Le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) fait contraste avec les deux essences précédentes puisqu'il est l'essence feuillue ayant le plus faible taux de recrutement. Son taux est en effet neuf fois plus faible que celui du cerisier de Pennsylvanie. Le bouleau jaune est une essence semi-tolérante à l'ombre qui ne s'installe que très sporadiquement en sous-étage. Contrairement au cerisier de Pennsylvanie, le taux de mortalité du bouleau jaune reste faible, ce qui explique une présence continue dans nos forêts. De plus, son adaptabilité et sa longévité en font un individu dominant dans la forêt québécoise. Aussi, c'est sans doute cette raison ainsi que pour la qualité de son bois et ses multiples utilisations, que ce feuillu noble a reçu le titre d'arbre emblème du Québec.

Le tableau 4.13 cumule les sommations par classe de DHP des tiges, montrées dans le bas des tableaux 4.1 à 4.10.

Du côté des résineux, seul le sapin baumier (*Abies balsamea* L.) tolère bien l'ombre, ce qui lui permet de s'installer graduellement en sous-étage et d'attendre une trouée. Il augmente ainsi le taux de recrutement des résineux. Son taux est presque deux fois plus grand que le taux de tous les autres résineux des bétulaies jaunes à résineux. D'un autre côté, le taux de recrutement du sapin baumier demeure nettement inférieur à celui du cerisier de Pennsylvanie et légèrement inférieur à celui de l'ensemble de la cohorte feuillue. Le sapin baumier, malgré son fort recrutement, n'enrésine que très rarement les bétulaies jaunes à résineux parce que même s'il s'installe en grand nombre, il devient vite la proie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.).

En général, les autres essences résineuses étudiées telles que la pruche du Canada (*Tsuga canadensis* [L.] Carr.), l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss.) et le thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.) ont un taux de recrutement clairement inférieur à toutes les autres essences feuillues. Ces espèces tolèrent peu l'ombre, mais une fois installées, elles semblent être plus longévives que le sapin baumier, comme le démontrent les courbes de mortalité apparaissant aux figures 5.4 et 5.5.

Tableau 4.13 Détermination du taux de recrutement décennal par période de croissance et par essence

ESS	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.	VIV.	REC.	TAUX DÉC.
BOJ	670	59	0.105	245	13	0.066	17	1	0.112	932	73	0.095
BOP	168	41	0.283	47	4	0.110	0	0	0.000	215	45	0.245
ERS	80	18	0.285	38	13	0.318	0	0	0.000	118	31	0.296
ERR	126	27	0.261	59	8	0.179	16	0	0.000	201	35	0.217
PRP	25	21	0.931	13	4	0.656	0	0	0.000	38	25	0.837
SAB	920	141	0.175	261	22	0.116	26	1	0.122	1207	164	0.161
EPB	120	7	0.073	26	1	0.051	0	0	0.000	146	8	0.069
EPR	59	6	0.100	21	1	0.059	0	0	0.000	80	7	0.089
THO	213	15	0.097	34	2	0.051	1	0	0.000	248	17	0.090
PRU	63	3	0.061	31	4	0.128	0	0	0.000	94	7	0.083
TOTAL	2444	338	0.162	775	72	0.117	60	2	0.084	3279	412	0.150

En résumé, le cerisier de Pennsylvanie possède un taux de recrutement nettement supérieur aux autres essences dans les bétulaies jaunes à résineux du Québec. Toutefois, par une sylviculture spécifique, il est possible de favoriser des essences nobles comme le bouleau jaune et l'érable à sucre. Les autres essences feuillues suivent et sont talonnées de près par le sapin baumier. Ce dernier constitue l'essence ayant le meilleur taux de recrutement chez les résineux.

Le recrutement n'explique pas à lui seul la composition en essences dans les bétulaies jaunes à résineux. Les conditions écologiques, la croissance et le taux de mortalité de chaque essence expliquent, avec le taux de recrutement, la présence relative des bouleaux jaunes accompagnés par différentes essences résineuses (thuya, sapin, épinette blanche, épinette rouge et pruche) dans les différentes bétulaies à résineux du Québec.

4.3 Prédiction du nombre de tiges recrutées par essence et par placette

Dans la section 4.2, nous avons illustré l'arrivée des recrutées en nous référant uniquement aux tiges vivantes déjà recrutées. Dans la présente section, nous désirons prédire le nombre de recrutées par unité de surface (par placette de 0,04 ha). Une deuxième fonction *APL* nommée *CMRECRUE4* a été conçue pour préparer les matrices de données par essence, en vue de la régression du phénomène de recrutement avec le logiciel *STATGRAPHICS PLUS v. 6.1*. Par souci de brièveté dans la présentation des tableaux, nous avons uniquement rapporté les données concernant le bouleau jaune dans les 52 premières placettes (tableau 4.14). L'ensemble des données est cependant disponible.

Pour prédire le nombre de tiges recrues susceptibles d'apparaître sur une base quinquennale par placette et par essence, nous avons déterminé le taux de recrutement quinquennal ainsi :

$$\text{NROBQ}_i = 5 \text{ ans} \times (\text{NROR}_i / \text{DURÉE}_i) \quad (4.1)$$

où

NROBQ_i : nombre de recrues observé sur une base quinquennale dans la placette i ,

NROR_i : nombre de recrues observé réellement sur le terrain au moment d'une remesure dans la placette i ,

DURÉE_i : longueur de la période de temps en années et fraction d'année pour la placette i , entre la mesure initiale et la mesure finale,

i : indice d'identification de la placette qui, dans le présent cas, varie de 1 à 101.

La durée représente le nombre d'années entre le moment d'une visite à une placette et celui de la visite précédente. Le lecteur peut constater la variabilité de cette donnée dans le tableau 4.14, à la troisième colonne (voir la figure 2.13). Mentionnons également que les huit premières colonnes des matrices sont identiques pour chaque essence car elles réfèrent à l'ensemble des essences présentes dans chacune des placettes. Le modèle retenu pour la prédiction du nombre de recrues sur une base quinquennale (NROBQ) s'exprime sous la forme polynomiale suivante :

$$\text{NROBQ} = \beta_1 + \beta_2 X_1 + \dots + \beta_{p+1} X_p + \varepsilon \quad (4.2)$$

La régression fait appel à deux familles de variables semblables comme régresseurs X_i : celle qui représente toute la population entière et celle qui représente la sous-population formée des tiges de l'essence considérée.

La première famille de variables explicatives concerne l'ensemble de la population. Elle a pour but d'indiquer la disponibilité d'espace pour les recrues compte tenu de la présence des tiges (toutes essences confondues) déjà installées. Les variables de cette famille sont :

NTM_t : nombre de tiges marchandes

DHPM_t : DHP moyen des tiges marchandes

STM_t : surface terrière des tiges marchandes

ID_t : indice de densité

t : indice signifiant toutes les essences confondues.

Dans la régression, les variables de cette famille ont surtout comme rôle d'expliquer le stade d'évolution de manière catabolique, c'est-à-dire de ralentir l'arrivée des recrues lorsque le niveau de la population approche de la saturation. Dans ce groupe, il convient de mentionner la surface terrière marchande (STM) et l'indice de densité (ID). Les signes des coefficients qui affectent ces variables sont tous négatifs. Dans cette famille de variables globales, il convient de mentionner aussi une variable spéciale ayant un rôle anabolique (inverse des précédentes); il s'agit du DHP moyen des tiges marchandes (DHPM). Cette variable indique l'état de jeunesse des tiges déjà installées dans la placette. Lorsque le DHPM est faible, c'est habituellement indicatif du fait qu'il y a encore des positions ou trouées disponibles (*Gaps*). Pour chacune des essences, le signe du coefficient qui affecte cette variable explicative est toujours positif.

La deuxième famille de variables explicatives réfère uniquement aux caractéristiques dendrométriques de l'essence à l'étude. Ces caractéristiques sont représentées par les variables spécifiques suivantes :

NTM_e : Nombre de tiges marchandes

DHPM_e : DHP moyen des tiges marchandes

STM_e : Surface terrière des tiges marchandes

ID_e : Indice de densité

e : Indice signifiant l'essence sous étude.

En général, dans les analyses effectuées par régression linéaire par étape, les variables spécifiques à une essence donnée sont statistiquement plus significatives que les variables globales énumérées auparavant. Ceci peut s'expliquer par des effets de grappe (*cluster*). On pourrait imaginer que l'arrivée ou non des recrues dépend de la seule essence sous analyse, mais cela semble surprenant pour des peuplements mélangés. Il y a un phénomène à mentionner, à savoir que la plupart des espèces marginales sont représentées non-uniformément dans l'échantillon. Par exemple, il y a 90 placettes dans lesquelles la pruche est absente, alors que dans les 11 autres placettes, cette essence représente plus du tiers des arbres présents pour toutes les essences confondues. Il semble que

Tableau 4.14 Matrice des variables impliquées dans la régression du recrutement pour l'essence BOJ

NO PLACETTE	PE	DURÉE	TOUTES ESSENCES					ESSENCE BOJ SEULEMENT					
			NTM	DHPM	STM	RECRUES	ID	NTM	DHPM	STM	RECRUES	ID	
452171081	1	7.36	20	20.79	0.68	3	0.739	10	23.39	0.43	2	0.423	
454274442	1	8.37	27	15.26	0.49	7	0.750	13	11.20	0.13	3	0.292	
454376162	1	7.23	23	25.89	1.21	2	1.107	3	38.11	0.34	0	0.272	
454574142	1	7.54	38	21.08	1.33	3	1.426	9	29.41	0.61	0	0.519	
460274581	1	8.27	38	20.60	1.27	4	1.390	5	33.31	0.44	1	0.353	
460274582	1	8.27	30	24.98	1.47	0	1.377	6	35.10	0.58	0	0.465	
460874452	1	8.27	24	25.98	1.27	2	1.160	12	22.09	0.46	0	0.474	
461274301	1	8.43	12	18.28	0.31	8	0.389	7	20.28	0.23	1	0.252	
461373462	1	10.85	25	19.54	0.75	5	0.866	6	23.63	0.26	0	0.257	
461476081	1	7.46	15	21.92	0.57	5	0.588	4	24.49	0.19	0	0.179	
461476082	1	7.46	38	15.53	0.72	5	1.069	21	12.94	0.28	4	0.517	
461574151	1	11.71	27	21.27	0.96	2	1.023	7	23.68	0.31	0	0.300	
461675431	1	7.79	15	39.53	1.84	1	1.462	3	37.32	0.33	0	0.261	
461874442	1	8.02	18	20.57	0.60	3	0.658	3	26.57	0.17	1	0.150	
462278332	1	6.82	23	22.92	0.95	0	0.949	19	17.74	0.47	0	0.600	
462377512	1	7.36	38	19.76	1.17	0	1.332	10	19.14	0.29	0	0.339	
462577192	1	6.59	30	23.32	1.28	2	1.263	6	26.56	0.33	0	0.299	
462674411	1	8.18	26	19.75	0.80	3	0.910	14	19.65	0.42	3	0.488	
462675161	1	7.25	18	20.58	0.60	0	0.658	4	26.84	0.23	0	0.202	
463378091	1	7.06	38	24.26	1.76	1	1.680	12	25.31	0.60	0	0.560	
463378092	1	7.06	17	35.42	1.67	1	1.339	4	28.62	0.26	0	0.222	
463577592	1	7.24	20	21.23	0.71	3	0.756	4	16.99	0.09	3	0.121	
463674551	1	6.81	35	20.78	1.19	2	1.293	13	25.99	0.69	1	0.629	
463878061	1	7.24	24	25.01	1.18	2	1.103	9	23.06	0.38	1	0.374	
463973282	1	9.92	42	15.96	0.84	5	1.209	7	24.54	0.33	0	0.314	
464074572	1	7.22	54	17.09	1.24	4	1.648	14	19.44	0.42	0	0.483	
464178171	1	6.58	7	22.87	0.29	1	0.288	3	21.64	0.11	1	0.116	
464178392	1	6.81	28	19.32	0.82	2	0.959	12	18.81	0.33	0	0.400	
464278191	1	6.80	20	21.81	0.75	3	0.779	8	20.83	0.27	0	0.296	
464278481	1	6.52	14	42.22	1.96	1	1.568	2	59.17	0.55	0	0.538	
464478361	1	6.35	38	15.99	0.76	2	1.095	8	16.41	0.17	1	0.236	
464573051	1	9.75	37	20.08	1.17	2	1.318	7	29.43	0.48	0	0.405	
464574501	1	13.18	37	16.66	0.81	10	1.104	6	25.24	0.30	0	0.279	
464775082	1	6.82	26	21.86	0.98	1	1.015	4	40.96	0.53	0	0.420	
464873122	1	10.37	19	26.62	1.06	2	0.949	8	21.94	0.30	0	0.314	
464972142	1	10.48	17	32.13	1.38	3	1.129	5	43.07	0.73	0	0.585	
464978421	1	6.82	20	23.25	0.85	0	0.839	3	43.93	0.45	0	0.367	
464978422	1	6.82	25	21.53	0.91	3	0.960	4	35.03	0.39	0	0.309	
465072382	1	10.28	10	24.62	0.48	3	0.451	3	31.53	0.23	0	0.193	
465174421	1	8.49	26	20.95	0.90	1	0.969	10	28.10	0.62	0	0.539	
465274132	1	11.12	14	31.10	1.06	3	0.882	6	42.91	0.87	2	0.696	
465371431	1	7.16	29	20.64	0.97	11	1.064	5	37.69	0.56	1	0.443	
465474421	1	8.55	32	24.81	1.55	1	1.456	8	39.08	0.96	0	0.761	
465674401	1	8.39	18	24.88	0.87	2	0.822	5	26.68	0.28	0	0.251	
465872011	1	10.25	17	19.50	0.51	8	0.588	6	14.50	0.10	3	0.160	
465873162	1	10.11	29	19.03	0.83	7	0.979	5	29.19	0.33	1	0.285	
465974191	1	11.32	15	27.03	0.86	5	0.766	8	32.41	0.66	0	0.539	
465974342	1	8.22	36	19.55	1.08	5	1.248	8	32.37	0.66	0	0.538	
465976422	1	6.25	25	18.73	0.69	2	0.830	12	20.64	0.40	1	0.440	
470073072	1	10.32	26	20.95	0.90	8	0.969	11	22.09	0.42	0	0.435	
470074292	1	8.20	27	20.73	0.91	3	0.995	3	40.53	0.39	0	0.308	
470175101	1	7.20	33	19.75	1.01	7	1.156	2	31.18	0.15	1	0.127	
101 PLACETTES			2547			361		670			59		

cette essence soit très sélective en terme de station; lorsque cette dernière lui convient, elle s'y installe massivement, sinon, elle est totalement absente. En ce qui concerne la signification biologique du signe des coefficients, il convient de mentionner que tous les coefficients affectant la variable $DHPM_e$ sont négatifs. Cela signifie que dans les peuplements murs, donc à fort DHPM, on prédit un faible effectif de recrues. Dans le même sens, les signes négatifs qui affectent les variables STM_e et ID_e permettront au modèle, lors de prédiction à long terme, de maintenir une quantité de tiges marchandes à un équilibre biologiquement acceptable en freinant l'arrivée des recrues.

Les résultats des régressions sont montrés dans les tableaux 4.15 à 4.18. Dans le premier de ces tableaux, on retrouve pour les essences feuillues, une estimation des coefficients et les tests d'inférences statistiques qui leur sont associés. Dans le deuxième, on indique la validité des régressions par l'analyse de la variance. Les deux tableaux suivants fournissent des renseignements semblables pour la cohorte résineuse.

En général, les valeurs de la statistique R^2 et de la statistique F sont faibles, même si nous avons considéré l'inclusion de huit variables explicatives. C'est pourquoi nous avons accepté les meilleures même si leur statistique t de Student était faible.

Afin de démontrer les choix définitifs des variables explicatives, nous avons préparé le tableau 4.19. Dans ce dernier, l'indice t signifie « toutes essences confondues » et l'indice e signifie que la variable qui lui est associée n'est que pour une essence donnée.

Nous devons admettre qu'en forêt mélangée, la prédiction du nombre de tiges recrues à un niveau aussi fin que celui de l'essence et de la placette est périlleuse. Dès que des données additionnelles seront disponibles, des efforts supplémentaires de recherche devront être consentis pour améliorer la précision et la stabilité de ces équations de prédiction.

Sur la figure 4.1, on constate que dans les placettes où l'on n'a pas observé la présence de recrues, le modèle en prédit très peu. Par contre, dans toutes les placettes où l'on a observé l'arrivée de plus d'une recrue, l'équation en a prédit toujours moins que la quantité réelle observée. Ceci reste vrai aussi bien pour le sapin que pour le bouleau jaune. Il semble que l'arrivée des recrues constitue, pour une certaine proportion de placettes, un phénomène partiellement aléatoire, donc difficilement explicable par les variables (régresseurs) sélectionnées. Cependant, nous verrons dans la section 4.5 que pour l'ensemble des

placettes, la quantité prédite voisinerait la quantité observée. En effet, en régression linéaire, la somme des recrues prédites égale la somme des recrues observées.

Dans la présente analyse, nous avons ignoré l'utilisation d'une troisième famille de variables qui réfèrent aux tiges non-marchandes ($DHP < 9$ cm), étant données que pour le moment, ces données ne nous sont pas accessibles. Dans une étude ultérieure, nous explorerons leur influence dans le but de produire des prédictions plus précises au niveau de chacune des placettes et des essences.

4.4 Désavantages à l'utilisation de la régression linéaire multiple

Par définition, une équation de régression linéaire multiple peut prédire un nombre négatif de recrues. Au point de vue forestier, une telle éventualité est biologiquement inacceptable. Pour pallier à cet inconvénient, la fonction *APL* « zéro-plafond » ($0I$) devient très utile. Elle remplace toutes les prédictions négatives par des prédictions nulles. Cependant, son utilisation engendre un biais positif pour l'ensemble des prédictions. En effet, la méthode des moindres carrés rend la somme des résidus égale à zéro; à ce moment il n'y a pas de biais car, mathématiquement, on peut accepter un nombre négatif de recrues prédites. Dans notre cas, nous rejetons les quelques prédictions négatives (très faibles) de recrues pour n'accepter que les prédictions positives; il faut s'attendre à ce que l'ensemble des prédictions soit légèrement biaisé. Le tableau 4.20 montre l'ampleur du biais pour chacune des essences conséquemment à l'utilisation de cette fonction.

4.5 Avantage à l'utilisation de la pondération

Lors d'une première estimation des coefficients de l'équation 4.1, nous n'avons pas tenu compte que la variable dépendante, le nombre observé de tiges recrues sur une base quinquennale (NROBQ), réfère à des durées différentes de croissance d'une placette à l'autre. Avec les coefficients estimés de cette façon, on obtient des prédictions qui s'écartent des valeurs observées. Ces résultats sont montrés au tableau 4.20.

Nous avons repris l'estimation des coefficients de la régression en utilisant la variable durée comme facteur de pondération. Les coefficients montrés dans les tableaux 4.15 et 4.17 réfèrent à ce deuxième exercice. Au tableau 4.21, on constate que cette pondération était nécessaire pour améliorer la qualité des prédictions. On évite ainsi l'obtention d'un biais positif.

Tableau 4.15. Coefficients des équations d'estimation du recrutement pour les essences feuillues

Essence : bouleau jaune

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,241148	0,042626	5,6574	0,0000
STM _t	β_2	-0,073247	0,037912	-1,9320	0,0562
DHPM _e	β_3	-0,003955	0,001510	-2,6197	0,0102

Essence : bouleau à papier

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,053296	0,031172	1,7097	0,0905
STM _t	β_2	-0,020583	0,027637	-0,7448	0,4582
NTM _e	β_3	0,024853	0,007737	3,2122	0,0018
DHPM _e	β_4	-0,001192	0,001279	-0,9317	0,3538
ID _e ²	β_5	-1,436613	0,836258	-1,7179	0,0890

Essence : érable à sucre

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,016842	0,009398	1,7921	0,0762
NTM _e	β_2	0,014996	0,003418	4,3875	0,0000
STM _t ²	β_3	-0,009081	0,008777	-1,0347	0,3034

Essence : érable rouge

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,092483	0,019879	4,6524	0,0000
NTM _e	β_2	-0,154608	0,050924	-3,0361	0,0031
DHPM _e	β_3	-0,009230	0,002091	-4,4148	0,0000
STM _e	β_4	-4,284226	1,985237	-2,1580	0,0334
ID _e	β_5	10,100293	3,109595	3,2481	0,0016
STM _e ²	β_6	-6,015128	1,824738	-3,2964	0,0014

Essence : cerisier de Pennsylvanie

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,122756	0,039654	3,0957	0,0026
ID _t	β_2	-0,031255	0,024002	-1,3022	0,1960
NTM _e	β_3	5,429627	1,412106	3,8451	0,0002
DHPM _e	β_4	-0,009926	0,003780	-2,6256	0,0101
STM _e	β_5	222,155372	52,148078	4,2601	0,0000
ID _e	β_6	-337,878583	85,523265	-3,9507	0,0001

Tableau 4.16. Tables d'analyse de la variance pour les régressions d'estimation du recrutement annuel pour les essences feuillues

Essence : bouleau jaune

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	2,16167	2	1,08083	8,93374	0,0003
Erreur	11,8564	98	0,120983		
Total (Corr.)	14,0180	100			
$R^2 = 0,1542$					

Essence : bouleau à papier

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	1,32607	4	0,3315170	4,40677	0,0026
Erreur	7,22198	96	0,0752290		
Total (Corr.)	8,54805	100			
$R^2 = 0,1551$					

Essence : érable à sucre

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	0,540248	2	0,2701240	9,65998	0,0001
Erreur	2,740400	98	0,0279632		
Total (Corr.)	3,280640	100			
$R^2 = 0,1647$					

Essence : érable rouge

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	2,31877	5	0,4637540	20,0236	0,0000
Erreur	2,20024	95	0,0231604		
Total (Corr.)	4,51901	100			
$R^2 = 0,5131$					

Essence : cerisier de Pennsylvanie

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	5,04141	5	1,0082800	19,7717	0,0000
Erreur	4,84464	95	0,0509962		
Total (Corr.)	9,88605	100			
$R^2 = 0,5099$					

Tableau 4.17. Coefficients des équations d'estimation du recrutement des essences résineuses

Essence : sapin baumier

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,240820	0,116792	2,0620	0,0419
DHPM _i	β_2	0,004317	0,003771	1,1450	0,2551
DHPM _e	β_3	-0,009691	0,004513	-2,1472	0,0343
ID _i ²	β_4	0,093609	0,034438	-2,7182	0,0078
NTM _e ²	β_5	0,000527	0,000127	4,1465	0,0001

Essence : épinette blanche

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,007392	0,010809	0,6839	0,4957
NTM _e	β_2	-0,000284	0,006875	-0,0413	0,9672
DHPM _e	β_3	-0,000667	0,001078	-0,6183	0,5378
ID _e	β_4	0,638040	0,425987	1,4978	0,1375
ID _e ²	β_5	-2,598556	1,064788	-2,4404	0,0165

Essence : épinette rouge

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	-0,019623	0,013450	-1,4590	0,1478
DHPM _i	β_2	0,000932	0,000586	1,5918	0,1147
NTM _e	β_3	6,348580	0,873609	7,2671	0,0000
STM _e	β_4	220,0463	30,48332	7,2186	0,0000
ID _e	β_5	-373,6984	51,61785	-7,2397	0,0000

Essence : thuya occidental

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,007583	0,010354	0,7324	0,4657
NTM _e	β_2	0,012413	0,002742	4,5262	0,0000
STM _e	β_3	0,157529	0,103323	1,5246	0,1306
ID _i ²	β_4	-0,010363	0,009245	-1,1209	0,2651
STM _e ²	β_5	-0,346300	0,129882	-2,6663	0,0090

Essence : pruche du Canada

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,003351	0,009243	0,3626	0,7177
DHPM _i	β_2	0,000453	0,000314	1,4399	0,1533
NTM _e	β_3	0,057299	0,005410	10,5912	0,0000
DHPM _e	β_4	-0,001479	0,000600	-2,4651	0,0156
STM _e	β_5	-1,216503	0,203467	-5,9789	0,0000
ID _e	β_6	1,214058	0,207189	5,8597	0,0000
ID _e ²	β_7	-0,445466	0,152274	-2,9254	0,0043
STM _e ²	β_8	0,396275	0,177411	2,2337	0,0279
NTM _e ²	β_9	-0,005016	0,000481	-10,4185	0,0000

Tableau 4.18. Tables d'analyse de la variance pour les régressions d'estimation du recrutement annuel pour les essences résineuses

Essence : sapin baumier

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	6,56422	4	1,64106	5,66594	0,0004
Erreur	27,8050	96	0,28963		
Total (Corr.)	34,3692	100			
$R^2 = 0,1910$					

Essence : épinette blanche

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	0,09976	4	0,02494	3,04374	0,0208
Erreur	0,78665	96	0,00819		
Total (Corr.)	0,88642	100			
$R^2 = 0,1125$					

Essence : épinette rouge

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	0,66897	4	0,16724	19,1574	0,0000
Erreur	0,83807	96	0,00873		
Total (Corr.)	1,50705	100			
$R^2 = 0,4439$					

Essence : thuya occidental

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	1,48210	4	0,37052	14,5822	0,0000
Erreur	2,43931	96	0,02540		
Total (Corr.)	3,92141	100			
$R^2 = 0,3779$					

Essence : pruche du Canada

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	0,33513	8	0,04189	22,8225	0,0000
Erreur	0,16887	92	0,00183		
Total (Corr.)	0,50400	100			
$R^2 = 0,6649$					

Tableau 4.19 Matrice des coefficients affectant les deux familles de variables de l'équation de prédiction du nombre de tiges recrues pour chacune des essences

ESSENCE		VARIABLES EXPLICATIVES GLOBALES				
	CONSTANTE	DHPMt	STMt	STMt*2	IDt	IDt*2
BOJ	0.2411	0.0000	-0.0732	0.0000	0.0000	0.0000
BOP	0.0533	0.0000	-0.0206	0.0000	0.0000	0.0000
ERS	0.0168	0.0000	0.0000	-0.0091	0.0000	0.0000
ERR	0.0925	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
PRP	0.1228	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0313	0.0000
SAB	0.2408	0.0043	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0936
EPB	0.0074	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
EPR	-0.0196	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
THO	0.0076	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0104
PRU	0.0034	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

ESSENCE		VARIABLES EXPLICATIVES SPÉCIFIQUES					
	NTMe	NTMe*2	DHPMe	STMe	STMe*2	IDe	IDe*2
BOJ	0.0000	0.0000	-0.0040	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BOP	0.0249	0.0000	-0.0012	0.0000	0.0000	0.0000	-1.4366
ERS	0.0150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ERR	-0.1546	0.0000	-0.0092	-4.2842	-6.0151	10.1003	0.0000
PRP	5.4296	0.0000	-0.0099	222.1554	0.0000	-337.8786	0.0000
SAB	0.0000	0.0005	-0.0097	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
EPB	-0.0003	0.0000	-0.0007	0.0000	0.0000	0.6380	-2.5986
EPR	6.3486	0.0000	0.0000	220.0463	0.0000	-373.6984	0.0000
THO	0.0124	0.0000	0.0000	0.1575	-0.3463	0.0000	0.0000
PRU	0.0573	-0.0050	-0.0015	-1.2165	0.3963	1.2141	-0.4455

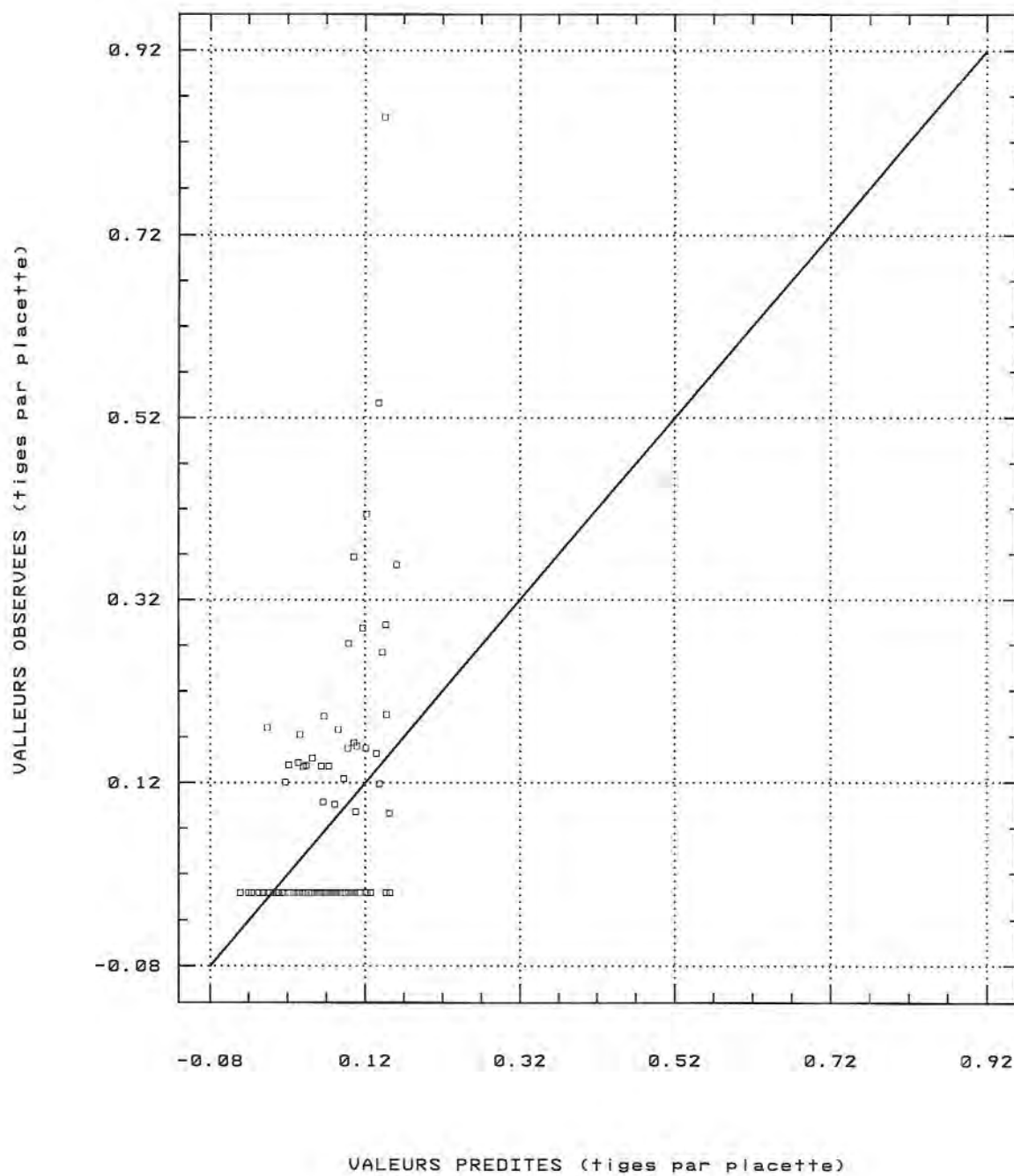


Figure 4.1. Nombre de recrues observé ou prédit sur une base annuelle pour le bouleau jaune.

Tableau 4.20 Biais dans les prédictions du nombre de recrues calculé dans les 101 placettes consécutivement à l'utilisation d'une régression linéaire non pondérée

ESSENCE	NOMBRE OBSERVÉ DE RECRUES	NOMBRE PRÉDIT DE RECRUES SANS LA FONCTION ZÉRO-PLAFOND	NOMBRE PRÉDIT DE RECRUES AVEC LA FONCTION ZÉRO-PLAFOND
BOJ	59	62.139	64.561
BOP	41	43.406	43.666
ERS	17	16.741	16.947
ERR	27	26.031	27.592
PRP	21	20.757	20.761
SAB	141	140.296	140.539
EPB	7	6.383	6.621
EPR	6	6.593	8.215
THO	15	16.463	17.774
PRU	3	2.668	3.582
TOTAL	337	341.477	350.258

Tableau 4.21 Biais dans les prédictions du nombre de recrues calculé dans les 101 placettes consécutivement à l'utilisation d'une régression linéaire pondérée

ESSENCE	NOMBRE OBSERVÉ DE RECRUES	NOMBRE PRÉDIT DE RECRUES SANS LA FONCTION ZÉRO-PLAFOND	NOMBRE PRÉDIT DE RECRUES AVEC LA FONCTION ZÉRO-PLAFOND
BOJ	59	58.278	65.433
BOP	41	40.795	41.904
ERS	17	17.000	17.143
ERR	27	26.999	28.360
PRP	21	20.997	23.038
SAB	141	141.028	141.028
EPB	7	6.994	7.481
EPR	6	5.995	7.467
THO	15	15.000	17.037
PRU	3	3.011	4.088
TOTAL	337	336.096	352.979

Chapitre cinq

Phénomène de la mortalité

Lors de l'élaboration de modèles de croissance et du rendement, il est utopique d'écarter le phénomène de la mortalité comme facteur explicatif de la production totale. Afin qu'un modèle de croissance performe adéquatement, il doit refléter la dynamique que l'on retrouve dans le milieu naturel. La mortalité survient dans tout peuplement forestier de façon asynchrone, parfois périodiquement, mais surtout avec une très grande variabilité autant temporelle que spatiale.

La mortalité est habituellement comptabilisée à partir d'un minimum de deux mesures réalisées à l'intérieur de placettes-échantillons permanentes. En comptant le nombre d'arbres qui étaient vivants en mesure initiale et qui ne le sont plus à la mesure suivante, on établit ainsi le nombre de tiges mortes. En divisant ce nombre par le nombre d'années écoulées entre les deux mesures, on obtient le nombre moyen de tiges mortes annuellement. De même, en divisant le nombre de tiges mortes observées à la mesure finale par le nombre de tiges vivantes à la mesure initiale, on obtient le taux de mortalité périodique. Ce taux peut être calculé par classe de DHP pour chaque placette ou pour toutes les placettes réunies. De plus, ce taux peut être calculé par essence ou encore pour toutes les essences confondues.

Lors de la présentation de Carpentier et Tardif (1994), nous avons mentionné que l'introduction d'un module de mortalité dans la méthodologie de projection de tables de peuplement était souhaitable pour rendre les résultats plus réalistes. En effet, pour une courte période par exemple cinq ans, on peut négliger la mortalité. Par contre, à plus long terme, on s'expose à des biais positifs très sérieux dans les valeurs dendrométriques prédites si ce phénomène est ignoré.

5.1 Types de mortalité

Dans la littérature forestière, un effort a été réalisé dans le but de simplifier la compréhension et la classification des multiples causes de mortalité. Pour ce faire, on a simplement fait intervenir les concepts de mortalité irrégulière et régulière. Afin de bien illustrer ces concepts de mortalité, prenons l'exemple des vieux peuplements. Ces derniers sont habituellement détruits par des périodes de perturbations catastrophiques. Dans ces circonstances, on est en présence de mortalité irrégulière. Cependant, dans les vieux peuplements qui ne sont pas atteints par de telles perturbations, les arbres de l'étage dominant meurent par mortalité régulière à cause de plusieurs facteurs comme le vent, la compétition, l'action de pathogènes, les sécheresses ou les insectes, qui deviennent plus efficaces à mesure que les arbres vieillissent et s'affaiblissent. La durée de vie maximale d'un peuplement varie en fonction de sa composition spécifique, de moins de 100 ans pour le saule noir (*Salix nigra* Marsh.) à plus de 1 000 ans pour le douglas (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] var. *menziesii*) et de 1 500 ans pour le séquoia toujours vert (*Sequoia sempervirens* [D. Don] Endl.) de la côte ouest de l'Amérique du nord (Oliver *et al.* 1990). À mesure que la mortalité régulière réduit le nombre d'arbres de l'étage supérieur, les arbres de l'étage inférieur croissent lentement pour renouveler l'étage supérieure. La mort des arbres de l'étage supérieur et la croissance des arbres du sous-étage ne sont pas causées par des facteurs extrinsèques. Ceci décrit bien la dynamique qui entoure la mortalité régulière. C'est ce dernier type de modalité qui est modélisé dans le modèle de prédiction *BOURES*.

5.1.1 Mortalité irrégulière

La mortalité irrégulière réfère aux arbres qui meurent sans avoir été supprimés ou sans avoir été affaiblis au cours du développement du peuplement. C'est un processus de mortalité catastrophique, exceptionnel et imprévisible; il est donc de nature aléatoire. La mortalité irrégulière peut toucher toutes les classes de cimes contrairement à la mortalité régulière. Un grand nombre de facteurs tels un feu de forêt, une épidémie d'insectes (tordeuse), un chablis important, l'activité humaine, un ouragan, le gel, la foudre et l'activité animale peuvent causer cette mortalité.

Le modèle *BOJRES* n'est pas conçu pour tenir compte de ce type de mortalité. Le modèle en ignore donc les effets lorsqu'ils sont importants. Dans la cohorte feuillue, aucune placette présente un taux de mortalité en surface terrière supérieur à 25 %. Aucune placette n'est donc éliminée par le fait qu'une mortalité irrégulière importante apparaît dans cette cohorte. Par contre, un grand nombre de placettes, où la cohorte résineuse est composée principalement de sapin baumier, présente un taux de mortalité en surface terrière supérieur à 25 %. Ces placettes sont retirées de notre sélection. Il faut se rappeler qu'une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.) a sévi pendant plusieurs années au cours de la période échantillonnée. On doit considérer ces causes de mortalité comme exogènes au système de prédiction du rendement *BOJRES*. Ces causes seront analysées dans une étude subséquente.

5.1.2 Mortalité régulière

La mortalité régulière, dont nous tiendrons compte dans le modèle *BOJRES*, peut être qualifiée de normale ou de naturelle. Elle provient, entre autres, de la compétition pour l'espace vital. Au fur et à mesure qu'un arbre croît, son métabolisme basal augmente. À moins que sa surface photosynthétique n'augmente suffisamment, les besoins physiologiques de l'arbre ne sont plus totalement comblés et celui-ci meurt éventuellement suite à une alimentation déficiente (Oliver *et al.* 1990).

Les feuilles de l'arbre supprimé ont une capacité de photosynthèse très faible puisqu'elles sont localisées à un niveau où l'intensité lumineuse est inférieure à celle dont bénéficient ses concurrents. Ce processus entraîne inévitablement la mort du feuillage et des branches de l'arbre supprimé. Ainsi, ceux-ci perdent beaucoup de surface à la cime et de capacité photosynthétique, ce qui diminue leur croissance en diamètre et en hauteur, leur résistance aux insectes et, éventuellement, leur capacité de développer des racines et des feuilles. Finalement, les arbres ainsi

affaiblis peuvent mourir à cause d'insectes, de maladies, de leur renversement ou simplement de carences en éléments nutritifs. Cette suppression suivie de la mort reste un résultat naturel du développement d'un peuplement; c'est un processus autogène. C'est donc parmi les arbres classés «supprimés» et «intermédiaires» que l'on retrouve habituellement les arbres morts tant dans les peuplements jeunes que dans les peuplements mûrs. Dans les peuplements plus âgés, cette mortalité se manifeste davantage chez les dominants et les codominants.

Il est difficile de constater quand exactement la mortalité modifie un peuplement forestier. En général, le nombre maximal de tiges vivantes par unité de surface d'un peuplement est inversement proportionnel à la grosseur (DHP) des tiges. Ce nombre maximum d'arbres qu'un peuplement peut supporter diminue avec l'âge puisque les arbres croissent constamment en grosseur et en hauteur; il en résulte de la mortalité par suppression. Nous avons étudié mathématiquement ce point précis à la section 2.4.5 traitant de la détermination de l'indice de densité de chacune des placettes. La mortalité régulière due au manque d'espace de croissance varie d'une année à l'autre. Les arbres supprimés obtiennent assez d'humidité pour survivre durant des années pluvieuses, mais le manque d'humidité lors des années sèches les déciment. Cette mort peut survenir à la fin de l'été lors de sécheresses ou tard le printemps quand les arbres supprimés n'ont pas assez d'énergie photosynthétique emmagasinée pour permettre l'élongation des pousses annuelles et la croissance des racines.

La mortalité par suppression ne se produit pas régulièrement et ceci constitue d'ailleurs un paradoxe puisque ce type de mortalité fait partie de la mortalité régulière (Oliver *et al.* 1990). Elle survient généralement pendant ou immédiatement après une période de température extrême ou de toutes autres conditions hostiles. Cependant, la stagnation créée par la suppression prédispose à la mortalité; cette stagnation a lieu à des intervalles prévisibles au cours du développement du peuplement.

5.2 Considérations relatives à la mortalité dans la littérature

Chaque essence possède son propre taux de mortalité qui modifie l'abondance et la distribution des tiges lors du développement du peuplement (Oliver 1978). D'après cet auteur, des essences telles la pruche de l'ouest (*Tsuga heterophylla* [Raf.] Sarg.), l'érable rouge (*Acer rubrum* L.), le bouleau occidental (*Betula occidentalis* Hook.), le cerisier amer (*Prunus emarginata* Dougl.) et le cerisier de Pennsylvanie (*Prunus pensylvanica* L.f.) ont des taux de mortalité

élevés comparativement aux essences associées. Ces essences sont très abondantes dans de très jeunes peuplements où elles semblent dominer au début, puis elles perdent rapidement leur dominance sur les autres essences ayant des taux de mortalité plus faibles. Parmi les essences étudiées dans les bétulaies jaunes à résineux, on a noté des taux de mortalité également élevés chez le cerisier de Pennsylvanie (*Prunus pensylvanica* L. f.), le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) ainsi que chez le sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.). On traite les taux de mortalité à la section 5.4.

Il existe aussi quelques essences qui n'ont pas nécessairement une courte période de vie mais qui possèdent quand même un haut taux de mortalité en comparaison aux autres essences du peuplement (Skeen 1981). La pruche de l'Ouest peut être beaucoup plus abondante que l'épinette de sitka (*Picea sitchensis* [Bong.] Carrière) en jeunes peuplements sur la côte de l'Alaska. Cependant, un nombre beaucoup plus important de pruches meurent par rapport aux épinettes dans les premières décennies de l'existence du peuplement (Deal 1987). Ces peuplements semblent évoluer d'un stade où la pruche domine vers un stade où l'on retrouve un mélange homogène de pruches et d'épinettes. Dans notre cas, la composition en essences semblent être stable. D'une part, 51 des 101 PEP des bétulaies jaunes mélangées à résineux évoluent très lentement vers la bétulaie jaune pure. D'autre part, 50 des 101 PEP s'enrésinent légèrement.

5.2.1 Importance de la mortalité et mécanismes de régénération

Pour une même essence, l'importance de la mortalité pour un peuplement donné peut varier d'un mécanisme de régénération à un autre, ou peut être semblable pour tous les mécanismes de régénération (Stephens et Waggoner 1970). Les chênes qui se régénèrent à partir de semences après une perturbation ont généralement un taux de mortalité plus élevé que ceux qui croissent à partir d'une régénération pré-établie. Certaines essences qui se régénèrent à partir de rejets de souche ont un fort taux de mortalité si toutes les nouvelles pousses de chaque souche sont comptées; généralement, une pousse sur trois survit (Wood 1939). Le taux de mortalité des rejets de souche est beaucoup plus faible si l'on considère le nombre de souches donnant des rejets plutôt que le nombre total de tiges. Dans le cas de régénération par germination de graines, la survie est grandement influencée par les conditions du lit de germination. On a observé dans nos placettes, que l'érable rouge constitue l'essence qui donne le plus de rejets de souche. Nous n'avons pas fait d'analyses poussées à ce sujet

puisque l'étude des mécanismes de régénération ne fait pas partie des objectifs principaux de la présente étude.

5.2.2 Mortalité chez les vétérans

Le moment de la mort d'un arbre dépend de l'espace de croissance disponible et de la grosseur des arbres (Oliver *et al.* 1990). Les séquoias géants (*Sequoiadendron giganteum* [Lindl.] Buchh.), qui sont des arbres énormes, vivent très longtemps lorsqu'ils trouvent assez d'espace pour développer une immense cime et un système imposant de racines. Le potentiel de la cime et les apports provenant des racines permettent une photosynthèse rapide. On suppose que la présence de vieux bouleaux jaunes vétérans dans nos placettes permanentes est due au même phénomène décrit précédemment. D'autres essences, comme les pins aristés (*bristlecone pines*, *Pinus aristata* Engelm. var. *aristata*), ayant un niveau de croissance normalement très faible, peuvent vivre très longtemps puisqu'elles n'ont que très peu de tissus vivants à entretenir (Oliver *et al.* 1990).

5.2.3 Sources de la mortalité

Le taux de mortalité demeure un paramètre difficile à estimer à cause de la longévité des arbres et de la faible probabilité de mortalité. Néanmoins, Shugart (1984) a tenté d'y parvenir à l'aide de modèles par trouées (*gap models*). Lors de la construction de ces modèles, il suppose que la mortalité est une conséquence de trois processus qui peuvent être considérés comme des sources.

La première source de mortalité tient compte du fait que la probabilité de mortalité, des arbres de tout âge, est reliée à leur taux de croissance. Sous des conditions optimales, l'utilisation de l'équation de croissance (Shugart 1984) donne les deux tiers du diamètre maximal lorsque la moitié de l'âge maximal est atteinte. Une équation statistique peut être dérivée en considérant qu'un certain pourcentage des tiges du peuplement n'atteindra jamais l'âge maximal.

$$P_n = 1 - (1 - \varepsilon)^n$$

où

P_n = probabilité de mortalité à l'âge n

ε = probabilité de mortalité annuelle.

Une deuxième source possible de mortalité est caractérisée par une augmentation de la mortalité intrinsèque quand le taux de croissance en diamètre d'un arbre est sous un certain seuil. Généralement, on estime une valeur de ε égale à 0,368 comme

probabilité de mortalité pour un arbre individuel ayant une croissance inférieure à 0,1 cm/année (Shugart 1984). En d'autres mots, cette probabilité signifie qu'un arbre opprimé ayant moins d'un millimètre de croissance en diamètre par année n'a seulement qu'un pour-cent de chance de survie au cours d'une période de dix ans.

La troisième source de mortalité est épisodique. Cette source constitue la mortalité irrégulière. Dans différents modèles de mortalité, les arbres sont détruits soit par la récolte (incluant les récoltes à diamètre spécifique et à essences spécifiques), soit par des blessures causées par la chute d'arbres voisins, soit par des feux de forêt, soit par des ouragans, soit par des inondations, ou encore par des épisodes de maladies. Ces effets sont généralement simulés en tabulant la mortalité prédite associée à la perturbation. On peut simuler la fréquence de l'événement soit de façon déterministe (une récolte par exemple) ou encore de façon aléatoire (dans le cas d'un ouragan).

5.2.4 Modèles de mortalité dépendants et indépendants de la distance entre les individus

Rondeux (1993) fait une distinction entre les modèles de mortalité indépendants des distances entre les individus et les modèles dépendants ou tributaires de ces mêmes distances.

Les premiers concernent la croissance d'un arbre qui subit la concurrence globale du peuplement, abstraction faite de sa position par rapport à ses voisins. La croissance individuelle ou par catégorie de grossueur d'un arbre est exprimée en fonction des variables caractéristiques du peuplement comme l'âge, la surface terrière, l'indice de productivité et la position sociale de l'individu. Généralement, ces modèles sont structurés en composantes intimement liées ayant respectivement trait à la croissance en diamètre et en hauteur, ainsi qu'à la mortalité (Avery et Burkhart 1983).

Les seconds imposent de connaître la localisation respective de chaque arbre soumis à la concurrence individuelle de ses voisins. La méthode utilisée afin de localiser les arbres, les coordonnées polaires, permettra de calculer cette concurrence dans nos prochains travaux. Ces modèles sont plus complexes à élaborer car ils doivent intégrer les effets de la compétition entre arbres, mais ils rendent mieux compte de la réaction de ceux-ci à des situations de croissance différentes et de répartition très irrégulière de l'espace vital entre les individus. L'accroissement de ces arbres est estimé en fonction des caractéristiques propres de la productivité des milieux et de l'intensité de la compé-

tition avec les voisins. Ils imposent la connaissance de la position absolue et relative de chacun des individus. D'après Hamilton (1988), la distribution spatiale de la mortalité est difficile à estimer. De plus, le patron de distribution de la mortalité ne demeure pas constant dans le temps, étant donné les effets d'agrégation. Glover et Hool (1979) prétendent que la mortalité est difficile à prédire d'une manière fiable parce que les fonctions de l'écosystème forestier sont complexes et les effets semblent parfois aléatoires. La composante mortalité présente en partie un caractère aléatoire et peut être simulée par des processus stochastiques basés sur des fonctions de probabilité mettant le plus souvent en oeuvre un indice de compétition, la dimension de l'arbre et des variables relatives au peuplement.

5.3 Nombre de tiges mortes par placette et par essence durant la période de croissance 1-2

Avant de calculer les taux périodiques de mortalité, nous désirons illustrer les observations brutes concernant la mortalité. À l'aide de la fonction *APL* nommée *CMORTPL*, nous fabriquons le tableau 5.1. Ce dernier indique, pour chacune des placettes, le nombre total de tiges mortes par placette. Ce nombre est également réparti au niveau de chacune des 10 essences principales entrant dans la composition des bétulaies jaunes à résineux.

On peut constater au tableau 5.1 qu'il y a de la mortalité dans 77 des 101 placettes. Dans ces dernières, le nombre de tiges mortes est très inégal, il varie entre un et onze. On retrouve des concentrations de mortalité dans les placettes 69, 71 et 87 où le sapin baumier est fortement impliqué. Dans la prochaine section, nous allons transformer ces données brutes en taux de mortalité périodique en tenant compte du fait que la longueur de la période de croissance 1-2 varie d'une placette à l'autre.

5.3.1 Illustration par essence et par période d'observation

À partir des sommations obtenues dans le bas des tableaux 5.2 à 5.11, nous avons procédé à des regroupements d'information. Ceux-ci se trouvent aux tableaux 5.12 à 5.16. On y constate que les taux de mortalité varient d'une période à l'autre. En effet, dans la section 5.1.1, nous avons mentionné que le facteur entomologique, la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.), était la cause principale de la fluctuation importante constatée dans les taux de mortalité pour le sapin baumier et pour l'épinette blanche.

Tableau 5.1 Nombre de tiges mortes observé par essence et par placette pour la période de croissance 1-2

NO	PLACETTE		BOJ	BOP	ERS	ERR	PRP	SAB	EPB	EPR	THO	PRU		TOT
1	452171081		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		1
2	454274442		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		1
3	454376162		1	0	0	0	0	0	0	0	0	1		2
4	454574142		0	0	0	0	0	1	0	0	0	2		3
5	460274581		2	0	0	0	0	1	0	0	0	0		3
6	460274582		0	0	1	0	0	5	0	0	0	0		6
7	460874452		3	0	1	0	0	0	0	0	0	0		4
8	461274301		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
9	461373462		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
10	461476081		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
11	461476082		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0		2
12	461574151		0	0	0	1	0	4	0	0	0	0		5
13	461675431		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		1
14	461874442		0	1	0	0	0	1	0	0	0	0		2
15	462278332		1	0	1	0	0	0	0	0	0	0		2
16	462377512		0	0	0	0	0	2	0	0	0	0		2
17	462577192		0	0	0	0	0	1	0	0	1	0		2
18	462674411		0	0	0	0	0	2	0	0	0	0		2
19	462675161		0	0	0	0	0	1	0	1	0	0		2
20	463378091		2	0	0	0	0	1	0	0	0	0		3
21	463378092		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
22	463577592		0	0	0	0	0	4	0	0	0	0		4
23	463674551		1	0	0	0	0	2	0	0	0	0		3
24	463878061		0	1	0	1	0	2	0	0	0	0		4
25	463973282		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0		2
26	464074572		3	1	0	0	0	1	1	0	0	0		6
27	464178171		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
28	464178392		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
29	464278191		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
30	464278481		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1
31	464478361		0	0	0	0	0	1	0	0	2	0		3
32	464573051		1	0	0	0	0	4	0	1	0	0		6
33	464574501		0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		1
34	464775082		1	0	0	0	0	1	0	0	0	0		2
35	464873122		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		1
36	464972142		0	0	0	2	0	0	0	0	0	0		2
37	464978421		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
38	464978422		0	0	0	2	0	1	0	0	0	0		3
39	465072382		1	0	0	0	0	2	0	0	0	0		3
40	465174421		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1
41	465274132		1	0	0	0	0	2	0	0	0	0		3
42	465371431		1	0	0	1	0	0	0	0	0	1		3
43	465474421		1	0	0	0	0	2	0	0	0	0		3
44	465674401		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
45	465872011		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		1
46	465873162		1	0	0	0	0	1	0	0	0	0		2
47	465974191		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		2
48	465974342		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
49	465976422		0	0	0	0	0	2	0	0	0	0		2
50	470073072		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
..														
101	PLACETTES		44	10	3	16	3	116	7	4	7	5		215

Tableau 5.1(suite) Nombre de tiges mortes observé par essence et par placette pour la période de croissance 1-2

NO	PLACETTE	I	BOJ	BOP	ERS	ERR	PRP	SAB	EPB	EPR	THO	PRU	I	TOT
51	470074292		1	0	0	0	0	2	0	0	0	0		3
52	470175101		0	0	0	0	0	2	0	0	0	0		2
53	470272081		1	0	0	0	0	1	0	0	0	0		2
54	470272132		0	0	0	1	1	2	0	1	0	0		5
55	470379061		0	0	0	3	0	0	0	0	0	0		3
56	470471222		0	0	0	0	0	2	0	0	0	0		2
57	470475182		0	0	0	0	0	2	0	0	0	0		2
58	470572252		2	0	0	0	0	2	0	0	0	0		4
59	470572412		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1
60	470572421		0	1	0	0	0	1	0	0	0	0		2
61	470573001		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
62	470574151		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		1
63	470675551		0	0	0	0	0	3	0	0	2	0		5
64	470678551		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1
65	470872011		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
66	470873371		0	0	0	0	0	2	0	0	0	0		2
67	470874102		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1
68	470875092		0	0	0	1	0	9	1	0	0	0		11
69	470971371		3	0	0	0	0	0	0	0	0	0		3
70	470977582		0	0	0	1	0	1	2	0	0	0		4
71	471078241		2	0	0	0	0	9	0	0	0	0		11
72	471078251		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
73	471078252		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
74	471172242		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
75	471274081		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
76	471274082		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
77	471377532		1	0	0	0	0	1	0	0	0	0		2
78	471472101		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
79	471472102		1	0	0	0	0	1	0	0	0	0		2
80	471672181		0	0	0	0	1	1	0	0	0	0		2
81	471672182		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1
82	471772121		0	0	0	0	0	1	1	0	0	0		2
83	471873132		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		2
84	471876032		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1
85	471978262		0	0	0	1	0	2	0	0	0	0		3
86	472076061		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
87	472173122		0	3	0	0	0	6	0	0	0	0		9
88	472176011		0	1	0	0	0	2	0	0	1	0		4
89	472272542		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		1
90	472375151		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
91	472873201		0	0	0	0	0	3	0	0	0	0		3
92	472874421		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		1
93	472979161		0	1	0	0	0	2	0	0	0	0		3
94	473068351		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		1
95	473469031		0	0	0	0	0	2	0	0	1	0		3
96	474072412		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
97	475772292		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
98	481067242		0	0	0	0	0	1	1	0	0	0		2
99	481266222		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
100	481670321		2	0	0	0	0	4	0	0	0	0		6
101	482071361		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		1
101	PLACETTES		44	10	3	16	3	116	7	4	7	5		215

Tableau 5.2 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour l'essence BOJ

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	175	7	0.048	70	6	0.108	1	0	0.000	246	13	0.065
16	102	7	0.082	36	2	0.070	3	0	0.000	141	9	0.077
20	98	2	0.024	33	2	0.077	0	0	0.000	131	4	0.037
24	68	3	0.052	28	3	0.136	4	0	0.000	100	6	0.074
28	61	3	0.058	20	3	0.190	1	0	0.000	82	6	0.090
32	51	3	0.070	20	1	0.063	2	0	0.000	73	4	0.066
36	35	5	0.170	12	0	0.000	3	0	0.000	50	5	0.119
40	21	2	0.113	7	0	0.000	1	0	0.000	29	2	0.082
44	15	0	0.000	7	0	0.000	1	0	0.000	23	0	0.000
48	20	4	0.238	6	0	0.000	0	0	0.000	26	4	0.183
52	7	1	0.170	1	0	0.000	1	0	0.000	9	1	0.132
56	17	7	0.490	5	0	0.000	0	0	0.000	22	7	0.378
TOTAL	670	44	0.078	245	17	0.088	17	0	0.000	932	61	0.079

Tableau 5.3 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour l'essence BOP

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	76	4	0.061	19	4	0.276	0	0	0.000	95	8	0.104
16	40	2	0.058	10	0	0.000	0	0	0.000	50	2	0.046
20	32	1	0.036	8	0	0.000	0	0	0.000	40	1	0.029
24	4	0	0.000	6	0	0.000	0	0	0.000	10	0	0.000
28	6	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	7	0	0.000
32	4	1	0.290	1	0	0.000	0	0	0.000	5	1	0.232
36	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
40	3	1	0.387	0	0	0.000	0	0	0.000	3	1	0.387
44	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
48	1	1	1.160	0	0	0.000	0	0	0.000	1	1	1.160
52	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
56	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
TOTAL	168	10	0.069	47	4	0.112	0	0	0.000	215	14	0.078

Tableau 5.4 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour l'essence ERS

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	38	1	0.033	23	1	0.040	0	0	0.000	61	2	0.036
16	12	0	0.000	5	0	0.000	0	0	0.000	17	0	0.000
20	10	1	0.127	4	1	0.232	0	0	0.000	14	2	0.157
24	5	1	0.254	2	0	0.000	0	0	0.000	7	1	0.181
28	3	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
32	5	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	7	0	0.000
36	3	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
40	2	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
44	2	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
48	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
52	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
56	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
TOTAL	80	3	0.048	38	2	0.049	0	0	0.000	118	5	0.048

Tableau 5.5 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour l'essence ERR

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	64	8	0.153	31	3	0.128	9	0	0.000	104	11	0.132
16	33	3	0.111	14	0	0.000	2	1	1.180	49	4	0.123
20	15	2	0.163	10	0	0.000	1	0	0.000	26	2	0.094
24	5	1	0.244	2	0	0.000	4	0	0.000	11	1	0.111
28	5	1	0.244	1	0	0.000	0	0	0.000	6	1	0.203
32	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
36	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
40	2	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
44	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
48	1	1	1.220	0	0	0.000	0	0	0.000	1	1	1.220
52	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
56	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
TOTAL	126	16	0.155	59	3	0.067	16	1	0.148	201	20	0.129

Tableau 5.6 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour l'essence PRP

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	20	3	0.166	11	2	0.388	0	0	0.000	31	5	0.245
16	3	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
20	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
24	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
28	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
32	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
36	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
40	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
44	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
48	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
52	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
56	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
TOTAL	25	3	0.133	13	2	0.328	0	0	0.000	38	5	0.200

Tableau 5.7 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour l'essence SAB

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	497	59	0.136	105	29	0.381	14	0	0.000	616	88	0.175
16	196	23	0.134	61	11	0.249	7	0	0.000	264	34	0.157
20	123	9	0.084	46	15	0.450	4	0	0.000	173	24	0.179
24	61	15	0.281	28	6	0.296	0	0	0.000	89	21	0.286
28	31	8	0.295	15	6	0.552	1	0	0.000	47	14	0.371
32	11	2	0.208	4	3	1.035	0	0	0.000	15	5	0.429
36	0	0	0.000	2	1	0.690	0	0	0.000	2	1	0.690
40	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
44	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
48	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
52	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
56	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
TOTAL	920	116	0.144	261	71	0.376	26	0	0.000	1207	187	0.191

Tableau 5.8 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour l'essence EPB

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	45	4	0.111	6	1	0.219	0	0	0.000	51	5	0.123
16	14	1	0.089	2	0	0.000	0	0	0.000	16	1	0.078
20	14	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	14	0	0.000
24	15	2	0.166	4	1	0.329	0	0	0.000	19	3	0.200
28	8	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	11	0	0.000
32	5	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	6	0	0.000
36	8	0	0.000	5	1	0.263	0	0	0.000	13	1	0.101
40	3	0	0.000	4	1	0.329	0	0	0.000	7	1	0.188
44	3	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
48	4	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
52	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
56	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
TOTAL	120	7	0.073	26	4	0.202	0	0	0.000	146	11	0.096

Tableau 5.9 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour l'essence EPR

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	25	4	0.157	9	0	0.000	0	0	0.000	34	4	0.115
16	12	0	0.000	6	0	0.000	0	0	0.000	18	0	0.000
20	8	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	10	0	0.000
24	5	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	8	0	0.000
28	5	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	5	0	0.000
32	2	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
36	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
40	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
44	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
48	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
52	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
56	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000
TOTAL	59	4	0.066	21	0	0.000	0	0	0.000	80	4	0.049

Tableau 5.10 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour l'essence THO

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	50	3	0.082	2	0	0.000	0	0	0.000	52	3	0.079
16	32	2	0.086	2	1	0.437	0	0	0.000	34	3	0.106
20	37	1	0.037	6	0	0.000	0	0	0.000	43	1	0.032
24	20	0	0.000	5	0	0.000	0	0	0.000	25	0	0.000
28	21	0	0.000	10	0	0.000	1	0	0.000	32	0	0.000
32	19	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	23	0	0.000
36	13	0	0.000	2	0	0.000	0	0	0.000	15	0	0.000
40	8	1	0.171	1	0	0.000	0	0	0.000	9	1	0.152
44	7	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	8	0	0.000
48	3	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	4	0	0.000
52	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
56	2	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
TOTAL	213	7	0.045	34	1	0.026	1	0	0.000	248	8	0.042

Tableau 5.11 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour l'essence PRU

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	21	2	0.123	9	1	0.110	0	0	0.000	30	3	0.119
16	2	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	6	0	0.000
20	4	1	0.323	1	0	0.000	0	0	0.000	5	1	0.258
24	6	0	0.000	4	0	0.000	0	0	0.000	10	0	0.000
28	2	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
32	6	1	0.215	4	1	0.247	0	0	0.000	10	2	0.228
36	5	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	8	0	0.000
40	3	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	3	0	0.000
44	1	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	2	0	0.000
48	1	0	0.000	0	0	0.000	0	0	0.000	1	0	0.000
52	3	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	6	0	0.000
56	9	1	0.143	2	0	0.000	0	0	0.000	11	1	0.117
TOTAL	63	5	0.102	31	2	0.064	0	0	0.000	94	7	0.090

Tableau 5.12 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour les essences résineuses

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	638	72	0.130	131	31	0.323	14	0	0.000	783	103	0.160
16	256	26	0.118	75	12	0.214	7	0	0.000	338	38	0.137
20	186	11	0.070	55	15	0.377	4	0	0.000	245	26	0.137
24	107	17	0.184	44	7	0.218	0	0	0.000	151	24	0.194
28	67	8	0.137	28	6	0.296	2	0	0.000	97	14	0.180
32	43	3	0.083	14	4	0.366	0	0	0.000	57	7	0.153
36	27	0	0.000	12	2	0.225	0	0	0.000	39	2	0.069
40	16	1	0.086	5	1	0.263	0	0	0.000	21	2	0.128
44	11	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	14	0	0.000
48	8	0	0.000	1	0	0.000	0	0	0.000	9	0	0.000
52	4	0	0.000	3	0	0.000	0	0	0.000	7	0	0.000
56	12	1	0.108	2	0	0.000	0	0	0.000	14	1	0.092
TOTAL	1375	139	0.117	373	78	0.285	27	0	0.000	1775	217	0.151

Tableau 5.13 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour les essences feuillues

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	373	23	0.073	154	16	0.143	10	0	0.000	537	39	0.092
16	190	12	0.075	65	2	0.039	5	1	0.472	260	15	0.074
20	156	6	0.046	56	3	0.062	1	0	0.000	213	9	0.050
24	83	5	0.073	39	3	0.097	8	0	0.000	130	8	0.076
28	75	4	0.064	22	3	0.173	1	0	0.000	98	7	0.088
32	61	4	0.077	24	1	0.053	2	0	0.000	87	5	0.069
36	39	5	0.152	14	0	0.000	3	0	0.000	56	5	0.106
40	28	3	0.126	7	0	0.000	1	0	0.000	36	3	0.098
44	18	0	0.000	9	0	0.000	1	0	0.000	28	0	0.000
48	22	6	0.324	6	0	0.000	0	0	0.000	28	6	0.255
52	7	1	0.170	1	0	0.000	1	0	0.000	9	1	0.132
56	17	7	0.490	5	0	0.000	0	0	0.000	22	7	0.378
TOTAL	1069	76	0.085	402	28	0.092	33	1	0.072	1504	105	0.086

Tableau 5.14 Taux de mortalité (TDM) par classe de DHP pour les essences feuillues et résineuses

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
12	1011	95	0.109	285	47	0.226	24	0	0.000	1320	142	0.132
16	446	38	0.100	140	14	0.133	12	1	0.197	598	53	0.110
20	342	17	0.059	111	18	0.218	5	0	0.000	458	35	0.097
24	190	22	0.135	83	10	0.161	8	0	0.000	281	32	0.139
28	142	12	0.098	50	9	0.242	3	0	0.000	195	21	0.133
32	104	7	0.080	38	5	0.168	2	0	0.000	144	12	0.102
36	66	5	0.090	26	2	0.104	3	0	0.000	95	7	0.091
40	44	4	0.112	12	1	0.110	1	0	0.000	57	5	0.109
44	29	0	0.000	12	0	0.000	1	0	0.000	42	0	0.000
48	30	6	0.238	7	0	0.000	0	0	0.000	37	6	0.193
52	11	1	0.108	4	0	0.000	1	0	0.000	16	1	0.074
56	29	8	0.331	7	0	0.000	0	0	0.000	36	8	0.267
TOTAL	2444	215	0.103	775	106	0.184	60	1	0.039	3279	322	0.121

Tableau 5.15 Taux de mortalité (TDM) pour chacune des essences feuillues et résineuses, toutes classes de DHP confondues

DHP	PÉRIODE 1-2			PÉRIODE 2-3			PÉRIODE 3-4			PÉRIODE 1-4		
	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM	VIV.	MORTS	TDM
BOJ	670	44	0.078	245	17	0.088	17	0	0.000	932	61	0.079
BOP	168	10	0.069	47	4	0.112	0	0	0.000	215	14	0.078
ERS	80	3	0.048	38	2	0.049	0	0	0.000	118	5	0.048
ERR	126	16	0.155	59	3	0.067	16	1	0.148	201	20	0.129
PRP	25	3	0.133	13	2	0.328	0	0	0.000	38	5	0.200
SAB	920	116	0.144	261	71	0.376	26	0	0.000	1207	187	0.191
EPB	120	7	0.073	26	4	0.202	0	0	0.000	146	11	0.096
EPR	59	4	0.066	21	0	0.000	0	0	0.000	80	4	0.049
THO	213	7	0.045	34	1	0.026	1	0	0.000	248	8	0.042
PRU	63	5	0.102	31	2	0.064	0	0	0.000	94	7	0.090
TOT	2444	215	0.103	775	106	0.184	60	1	0.039	3279	322	0.121

Tableau 5.16 Détermination du nombre de tiges mortes par essence sur une base décennale pour la période 1-2 et pour toutes les placettes

ESSENCES	PAR HECTARE	PAR 0.04 HECTARE
BOJ	1307.93	52.32
BOP	289.92	11.60
ERS	95.15	3.81
ERR	488.07	19.52
PRP	83.13	3.33
SAB	3316.83	132.67
EPB	217.96	8.72
EPR	98.01	3.92
THO	239.97	9.60
PRU	161.27	6.45
TOT	6298.25	251.93

Entre les essences, il y a des différences considérables. Les taux de mortalité varient de 4 à 20 % sur une base décennale. Les essences les plus longévives sont, dans l'ordre : le thuya occidental, l'érable à sucre et l'épinette rouge. Parmi les moins longévives, il convient de mentionner le cerisier de Pennsylvanie et le sapin baumier.

5.3.2 Quantification de la mortalité par classe de DHP et par essence

Dans cette section, l'analyse de la mortalité est envisagée par son aspect le plus simple dans le but d'être expliquée dans la section 5.5 à partir d'une seule variable indépendante, le DHP. Cette variable étant intrinsèquement connue lors de l'utilisation de la méthodologie de projection de tables de peuplement, on pourra alors utiliser les équations d'estimation du taux de mortalité dans ce cadre. Le système élaboré ici servira de modèle de base, par la suite des améliorations seront suggérées et elles seront analysées lors de recherches ultérieures.

5.4 Détermination du taux de mortalité à partir des données de base

D'après les tableaux 5.14 et 5.15, dans les 101 placettes mesurées au moins deux fois, on a constaté que pour les dix essences principales, parmi les 3 279 arbres vivants en début de période, 322 étaient morts au moment de la mesure subséquente.

Puisque l'intervalle entre les remesurages dans les placettes n'est pas constant, nous avons dû ramener linéairement les différents taux de mortalité à une base temporelle fixe. Les bases habituellement utilisées en foresterie sont : 1, 5 ou 10 ans. Dans le cas présent, la méthode préliminaire de projection de tables de peuplement fonctionnant antérieurement sur un pas itératif de dix ans, nous retenons donc cette base. Ainsi, nous nous servons d'une base décennale pour illustrer les taux de mortalité.

En posant l'hypothèse que, pour une période donnée de moins de dix ans, le taux de mortalité périodique est constant pour une courte période, nous avons établi que le nombre de tiges mortes après dix ans est le double de celui que l'on a observé sur le terrain si la durée entre les deux visites avait été de cinq ans. Plus généralement, le taux décennal de mortalité (TDM) est établi comme suit :

$$\text{TDM} = \frac{N.T. \text{ mortes observées } \times 10 \text{ ans}}{N.T. \text{ vivantes observées } \times \text{Durée}}$$

Chacun des tableaux 5.2 à 5.12 comprend les compilations de mortalité par classe de DHP de 4 cm, par période d'observation et pour l'ensemble des trois périodes. Dans ces tableaux, en colonne 1, on trouve le centre des classes de DHP. La première classe, celle des 12 cm, débute à 9,1 et se termine à 14,0 cm; elle est donc exceptionnellement plus large que les suivantes.

Dans le cas du bouleau jaune, on constate qu'il y avait au début de la période 1-2, 175 tiges vivantes dans la classe de DHP de 12 centimètres. De ce nombre, sept ont été déclarées mortes lors de la deuxième mesure. En pondérant par le temps écoulé, variable d'une placette à l'autre, entre la date de l'observation 1 et la date de l'observation 2, on obtient un taux de mortalité décennal de 0,048. En procédant de la même manière pour chacune des classes de DHP et pour chacune des périodes, on constate que les nombres de tiges vivantes et mortes pour les périodes 2-3 et 3-4 sont plus faibles que pour la période 1-2. Cela s'explique par le fait que les remesurages sont respectivement disponibles pour seulement 60 et 5 placettes au moment des compilations. La synthèse globale, intitulée « Période 1-4 », apparaissant dans les colonnes 11, 12 et 13 des tableaux, est le résultat d'une pondération des TDM par les durées des périodes de croissance pour chaque classe de DHP. On y constate donc que sur 932 observations de tiges de bouleaux jaunes vivantes à la mesure initiale, 61 ont été déclarées mortes lors de la mesure suivante.

5.4.1 Compilation par classe de DHP et par groupe d'essences

Pour synthétiser les observations concernant la mortalité, nous avons regroupé les résultats en deux grandes familles : les essences résineuses et les essences feuillues. En comparant les tableaux 5.12 et 5.13, on constate que les effectifs résineux sont légèrement plus importants que les effectifs feuillus autant en tiges vivantes qu'en tiges mortes. De plus, les taux de mortalité des résineux y sont presque le double de ceux des feuillus. En général, c'est pour l'intervalle 2-3 que les taux de mortalité sont à leur maximum. On peut supposer que cela est dû à un effet important de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.), même si les placettes présentant des taux de mortalité supérieurs à 25 % en surface terrière ont été retirées de l'échantillon de base. En effet, dans les placettes retenues, c'est pour le sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.) et l'épinette blanche (*Picea glauca* [Moench] Voss.) que les taux de mortalité ont augmenté le plus entre la période 1-2 et la période 2-3.

Pour l'ensemble de la cohorte feuillue, les taux de mortalité par période sont beaucoup plus constants que ceux des résineux. Par contre, on constate que les taux par classe de DHP augmentent lorsque le DHP de la classe augmente. Nous verrons dans une prochaine section que ces taux par classe ont avantage à être lissés pour servir dans la modélisation. En effet, on y constate que le très faible échantillonnage par classe de DHP occasionne des fluctuations inacceptables, en particulier dans les classes où le DHP est élevé.

5.4.2 Taux de mortalité par période pour toutes les essences confondues

Entre les années 1970 et 1990, le taux décennal de mortalité (TDM) observé, toutes essences confondues et toutes classes de DHP, est estimé à environ 12 %. Ce taux indique que le phénomène de la mortalité n'est pas négligeable : il y a une dynamique importante des tiges dans les bétulaies jaunes à résineux. Ce taux global pourrait servir aux utilisateurs qui négligent la distinction des produits par essence et par classe de DHP mais ceci n'est pas notre cas. Nous remarquons que le taux de mortalité n'est pas constant d'une classe de DHP à une autre. Nous illustrons la provenance de ce taux décennal de mortalité par la présentation du tableau 5.14. La méthode de pondération expliquée dans la section précédente s'applique également à celui-ci.

5.4.3 Taux de mortalité par période et par essence

Toutes les compilations apparaissant dans les sections précédentes sont regroupées dans le tableau 5.15. On y perd la notion de classe de DHP mais, par contre, on peut comparer plus facilement l'importance de la mortalité d'une essence à l'autre et d'une période à l'autre.

Les taux de mortalité pour un même ensemble de tiges, à l'exception de celles qui sont mortes dans une période donnée, ne sont pas nécessairement constants d'une période d'observation à l'autre. Les tableaux 5.2 à 5.15 illustrent bien ce phénomène perturbant pour un modélisateur dont l'un des buts consiste à généraliser l'applicabilité d'un modèle simple. Les raisons qui expliquent quelque peu le phénomène sont les suivantes :

A - Les placettes vieillissent et se rapprochent donc de la décrépitude qui est l'aboutissement normal de toute forme de vie sur terre.

B - Des insectes comme la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.), même à faible intensité, peuvent faire basculer de vie à trépas de faibles arbres à une période donnée. Par la suite, l'effet néfaste des insectes est atténué lorsque ces arbres sont déjà morts et qu'ils sont remplacés par des plus jeunes, plus vigoureux et moins vulnérables.

C - Les perturbations naturelles légères ne sont pas identifiées dans les échantillonnages disponibles mais elles peuvent cependant provoquer la mort de certaines tiges de la placette.

D - Les perturbations humaines comme la coupe jardinatoire ou l'éclaircie par le bas, même à faible intensité, conduisent à une très forte diminution des taux de mortalité. Selon le moment de ces événements, leurs effets peuvent se répercuter sur l'une ou l'autre des périodes d'observation.

Lors de la modélisation, nous pouvons tenir compte de certaines de ces raisons par un choix judicieux de variables explicatives. Par contre, il y a des événements aléatoires ou inconnus qui ne peuvent pas être modélisés. C'est pourquoi il faut utiliser prudemment les extrants d'une modélisation parce que le passé n'est pas toujours garant de l'avenir, surtout si ce passé est, ou bien trop récent ou encore, trop lointain par rapport à la période future à prédire.

Au tableau 5.16, on trouve pour la période de croissance 1-2, les quantités théoriques de tiges mortes sur les bases placette et hectare, en supposant que les taux de mortalité sont constants au niveau de chacune des placettes pour une période de dix années.

5.5 Estimation des coefficients de régression pour la prédiction des taux de mortalité

Pour la projection de tables de peuplement, on peut utiliser des taux observés de mortalité par classe de DHP. Cette procédure est acceptable, lorsque les effectifs en tiges vivantes et en tiges mortes sont suffisants pour permettre une estimation valable pour toutes les classes de DHP. Par contre, avec un faible échantillonnage et avec des effectifs répartis en dix essences, nous devons procéder par régression. Même avec une amplitude de classe de DHP de 4 cm, on peut constater, dans les tableaux 5.2 à 5.11 pour la période globale 1-4, plusieurs valeurs nulles pour la variable « nombre de tiges vivantes (VIV.) ». Il y en a encore plus pour la variable « nombre de tiges mortes (MORTS) ». De plus, les faibles effectifs rendent les taux de mortalité par classe extrêmement fluctuants.

La solution au problème de fluctuation est obtenue par un lissage au moyen d'une régression linéaire pondérée du second degré, pour chacune des essences. La pondération par le nombre de tiges vivantes à chaque classe de DHP est ici essentielle puisqu'un taux décennal de mortalité (TDM) égal à zéro, basé sur l'observation de 17 tiges vivantes dans la classe de 16 cm pour l'essence ERS (tableau 5.4), n'a pas la même signification que le TDM également égal à zéro dans la classe de 48 cm qui ne contient aucune tige vivante. Les taux de mortalité (TDM) calculés sont obtenus par lissage au moyen de la régression suivante :

$$\text{TDM} = \beta_1 + \beta_2 \text{DHP} + \beta_3 \text{DHP}^2 + \varepsilon \quad (5.1)$$

Les résultats d'estimation des coefficients β_i , $i = 1, \dots, 3$, apparaissent dans les tableaux 5.17 et 5.19 respectivement pour chacune des essences feuillues et des essences résineuses. Les valeurs observées et prédites des régressions sont montrées pour le bouleau jaune et le sapin baumier aux figures 5.1 et 5.2. Les points prenant la valeur 0 correspondent à des classes de DHP où aucune mortalité a été observée.

5.5.1 Inférences statistiques sur les régressions de mortalité par essence

Les résultats d'analyse de variance des régressions linéaires apparaissent dans les tableaux 5.18 et 5.20. Il convient d'interpréter les résultats de la façon suivante :

On calcule le coefficient de détermination R^2 ainsi :

$$R^2 = \frac{\text{Somme des carrés du modèle}}{\text{Somme totale des carrés}}$$

ou encore

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Somme des carrés des résidus}}{\text{Somme totale des carrés}}$$

La valeur obtenue pour ce coefficient est une réalisation possible d'une variable aléatoire positive toujours bornée entre 0 et 1. Lorsque la statistique $R^2 = 1$, cela implique que les observations sont expliquées de façon déterministe par le modèle, c'est-à-dire que 100 % de la variation est expliquée. À l'opposé, lorsque la statistique $R^2 = 0$, cela signifie que les variables explicatives (régresseurs) n'ont aucun pouvoir explicatif. En pratique, la valeur obtenue se situe entre 0 et 1.

On calcule la statistique F pour tester l'absence d'influence des variables explicatives sur le taux décennal de mortalité ainsi :

$$F = \frac{(\text{Somme totale des carrés} - \text{somme des carrés des résidus}) / (p - 1)}{\text{Somme des carrés des résidus} / (n - p)}$$

ce qui est équivalent à :

$$F = \frac{R^2 / (p - 1)}{(1 - R^2) / (n - p)^2}$$

La statistique F est donc une fonction monotone croissante du coefficient de détermination R^2 . Dans le cas du bouleau jaune, nous constatons que nous avons $n = 12$ classes de DHP avec un nombre de tiges vivantes initiales différent de zéro. Nous avons donc $(n-1) = 11$ degrés de liberté. Nous avons également trois coefficients β à estimer, donc $p = 3$.

$$\begin{aligned} \text{Carrés moyens de la régression (Modèle)} \\ = 1,66235 / (p-1) = 0,831175 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Carrés moyens des résidus (Erreur)} \\ = 1,02293 / (n-p) = 0,113659 \end{aligned}$$

Le test F de l'hypothèse $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$, donne, pour cet ensemble d'observations :

$$F_{\text{obs}} = \frac{0,831175}{0,113659} = 7,31$$

Comme F_{obs} est plus grand que $F_{2,9}^{-1}(0,05) = 4,26$, on peut conclure que l'hypothèse d'une influence du DHP ou du DHP^2 sur le taux de mortalité est vraisemblable. Il y a donc une dépendance entre le taux de mortalité et au moins un des régresseurs. On retrouve également des résultats positifs dans le cas du cerisier de Pennsylvanie, du sapin baumier et de l'épinette rouge.

Les valeurs de F_{obs} estimées à 4,022 et à 4,213 nous indiquent que le résultat de la régression est très marginal dans le cas du bouleau à papier et du thuya occidental.

Par contre, on ne retrouve pas de dépendance entre le taux décennal de mortalité par classe de DHP et au moins un des régresseurs dans le cas des autres essences marginales qui présentent des bas degrés de liberté. Dans le cas des quatre essences : érable à sucre, érable rouge, épinette blanche et pruche du Canada, comme l'indiquent les tableaux 5.18 et 5.20

Tableau 5.17. Coefficients des régressions linéaires d'estimation de la mortalité pour les essences feuillues

Groupe : bouleau jaune

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,141431	0,057065	2,4784	0,0351
DHP	β_2	-0,008032	0,004432	-1,8124	0,103
DHP ²	β_3	0,000184	0,000074	2,5015	0,0338

Groupe : bouleau à papier

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,449087	0,170942	2,6271	0,0341
DHP	β_2	-0,039377	0,016189	-2,4324	0,0453
DHP ²	β_3	0,000890	0,000330	2,6941	0,0309

Groupe : érable à sucre

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	-0,146174	0,134881	-1,0837	0,3201
DHP	β_2	0,019800	0,013090	1,5126	0,1811
DHP ²	β_3	-0,000408	0,000265	-1,5440	0,1735

Groupe : érable rouge

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	0,412841	0,198070	2,0843	0,0916
DHP	β_2	-0,032100	0,019583	-1,6392	0,1621
DHP ²	β_3	0,000798	0,000424	1,8825	0,1185

Groupe : cerisier de Pennsylvanie

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	β_1	1,706920	0,410441	4,1587	0,1502
DHP	β_2	-0,173359	0,051889	-3,3409	0,1851
DHP ²	β_3	0,004286	0,001508	2,8415	0,2154

Tableau 5.18. Tables d'analyse de la variance des régressions linéaires d'estimation de la mortalité pour les essences feuillues

Groupe : bouleau jaune

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	1,66235	2	0,83117	7,31287	0,0130
Erreur	1,02293	9	0,11365		
Total (Corr.)	2,68528	11			
$R^2 = 0,5344$					

Groupe : bouleau à papier

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	1,02229	2	0,51114	4,02215	0,0687
Erreur	0,88957	7	0,12708		
Total (Corr.)	1,91186	9			
$R^2 = 0,4018$					

Groupe : érable à sucre

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	0,10874	2	0,05437	1,19276	0,3663
Erreur	0,27350	6	0,04558		
Total (Corr.)	0,38225	8			
$R^2 = 0,2845$					

Groupe : érable rouge

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	0,59993	2	0,29996	2,05856	0,2227
Erreur	0,72858	5	0,14571		
Total (Corr.)	1,32851	7			
$R^2 = 0,4516$					

Groupe : cerisier de Pennsylvanie

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	0,33483	2	0,16741	22,4342	0,1457
Erreur	0,00746	1	0,00746		
Total (Corr.)	0,34229	3			
$R^2 = 0,9782$					

Tableau 5.19. Coefficients des régressions linéaires d'estimation de la mortalité pour les essences résineuses

Groupe : sapin baumier

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	B1	0,34060	0,13309	2,5591	0,0507
DHP	B2	-0,02465	0,01487	-1,6582	0,1582
DHP ²	B3	0,00087	0,00038	2,2818	0,0714

Groupe : épinette blanche

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	B1	0,12386	0,12672	0,9774	0,3570
DHP	B2	-0,00094	0,01073	-0,0880	0,9321
DHP ²	B3	-0,00001	0,00019	-0,0571	0,9559

Groupe : épinette rouge

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	B1	0,40007	0,09496	4,2129	0,0084
DHP	B2	-0,03195	0,00963	-0,3170	0,0211
DHP ²	B3	0,00059	0,00021	2,7208	0,0417

Groupe : thuya occidental

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	B1	0,19493	0,06830	2,8538	0,0190
DHP	B2	-0,01068	0,00538	-0,9831	0,0787
DHP ²	B3	0,00015	0,00009	1,5889	0,1465

Groupe : pruche du Canada

Variable explicative	Nom du coefficient	Coefficient	Écart type	t	Prob > t
Constante	B1	0,15807	0,12462	1,2684	0,2365
DHP	B2	-0,00429	0,00927	-0,4631	0,6543
DHP ²	B3	0,00005	0,00014	0,3611	0,7263

Tableau 5.20. Tables d'analyse de la variance des régressions linéaires d'estimation de la mortalité pour les essences résineuses

Groupe : sapin baumier

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	3,25437	2	1,62718	9,55931	0,0196
Erreur	0,85109	5	0,17022		
Total (Corr.)	4,10546	7			
$R^2 = 0,7927$					

Groupe : épinette blanche

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	0,04179	2	0,02089	0,26254	0,7755
Erreur	0,63682	8	0,07960		
Total (Corr.)	0,67861	10			
$R^2 = 0,0616$					

Groupe : épinette rouge

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	0,20870	2	0,10435	10,1831	0,0172
Erreur	0,05123	5	0,01024		
Total (Corr.)	0,25994	7			
$R^2 = 0,7240$					

Groupe : thuya occidental

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	0,21975	2	0,10988	3,28724	0,0848
Erreur	0,30083	9	0,03342		
Total (Corr.)	0,52059	11			
$R^2 = 0,4221$					

Groupe : pruche du Canada

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F	Prob > F
Modèle	0,03267	2	0,01633	0,22981	0,7992
Erreur	0,63973	9	0,07108		
Total (Corr.)	0,67240	11			
$R^2 = 0,0486$					

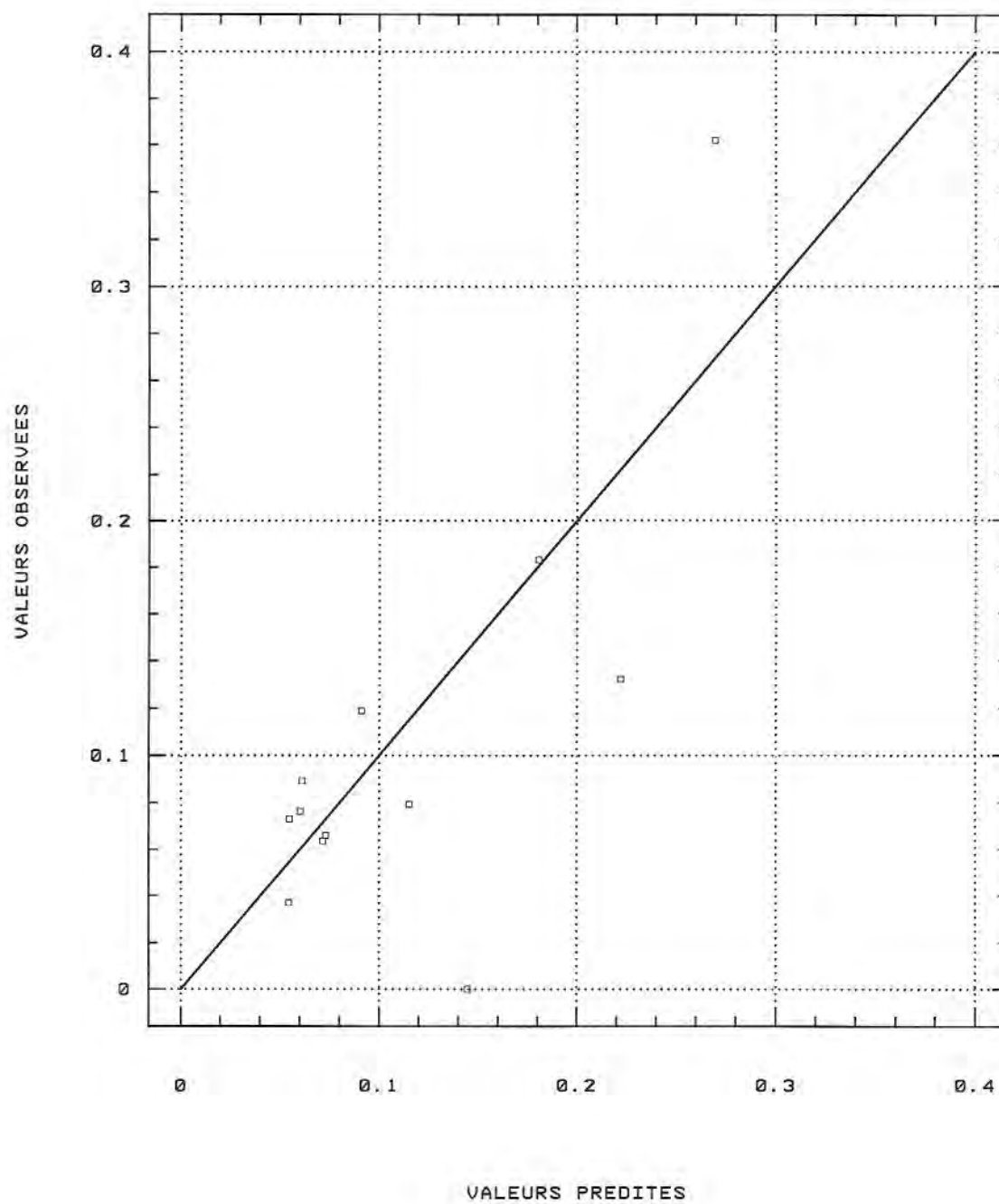


Figure 5.1. Taux décennal de mortalité observé et prédit pour le bouleau jaune.

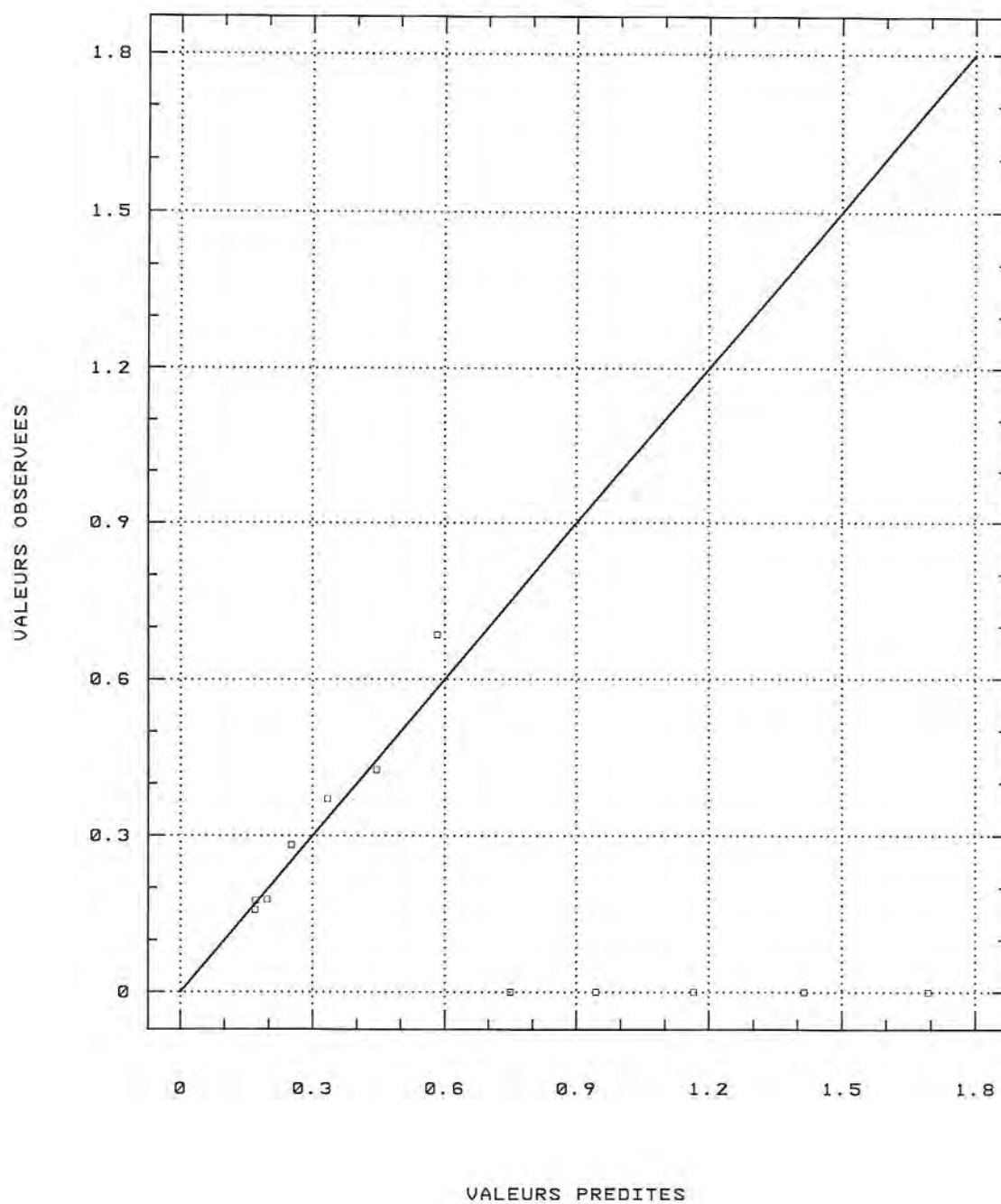


Figure 5.2. Taux décennal de mortalité observé et prédit pour le sapin baumier.

Tableau 5.21 Prédiction des taux décennaux de mortalité par classe de DHP et par essence

DHP	BOJ	BOP	ERS	ERR	PRP	SAB	EPB	EPR	THO	PRU	FEU	RES	TOT
10	0.08	0.14	0.01	0.17	0.40	0.18	0.11	0.14	0.10	0.12	0.10	0.15	0.14
12	0.07	0.10	0.03	0.14	0.24	0.17	0.11	0.10	0.09	0.11	0.09	0.15	0.13
14	0.07	0.07	0.05	0.12	0.12	0.17	0.11	0.07	0.07	0.11	0.08	0.16	0.12
16	0.06	0.05	0.07	0.10	0.03	0.17	0.11	0.04	0.06	0.10	0.07	0.16	0.12
18	0.06	0.03	0.08	0.09	0.00	0.18	0.10	0.02	0.05	0.10	0.07	0.16	0.11
20	0.05	0.02	0.09	0.09	0.00	0.20	0.10	0.00	0.04	0.09	0.06	0.16	0.11
22	0.05	0.01	0.09	0.09	0.00	0.22	0.10	0.00	0.03	0.09	0.06	0.16	0.11
24	0.05	0.02	0.09	0.10	0.02	0.25	0.09	0.00	0.03	0.08	0.06	0.15	0.11
26	0.06	0.03	0.09	0.12	0.10	0.29	0.09	0.00	0.02	0.08	0.06	0.15	0.10
28	0.06	0.04	0.09	0.14	0.21	0.33	0.09	0.00	0.01	0.08	0.06	0.15	0.10
30	0.07	0.07	0.08	0.17	0.36	0.39	0.09	0.00	0.01	0.07	0.07	0.14	0.10
32	0.07	0.10	0.07	0.20	0.50	0.44	0.08	0.00	0.01	0.07	0.07	0.14	0.11
34	0.08	0.14	0.06	0.24	0.50	0.50	0.08	0.00	0.01	0.07	0.08	0.13	0.11
36	0.09	0.18	0.04	0.29	0.50	0.50	0.08	0.02	0.01	0.07	0.09	0.12	0.11
38	0.10	0.24	0.02	0.35	0.50	0.50	0.07	0.04	0.01	0.07	0.10	0.12	0.11
40	0.11	0.30	0.00	0.41	0.50	0.50	0.07	0.07	0.01	0.07	0.12	0.11	0.12
42	0.13	0.37	0.00	0.47	0.50	0.50	0.06	0.11	0.01	0.07	0.13	0.10	0.12
44	0.14	0.44	0.00	0.50	0.50	0.50	0.06	0.15	0.02	0.07	0.15	0.09	0.13
46	0.16	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.06	0.19	0.02	0.07	0.17	0.08	0.14
48	0.18	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.05	0.24	0.03	0.07	0.19	0.07	0.15
50	0.20	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.05	0.29	0.04	0.07	0.21	0.06	0.16
52	0.22	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.04	0.35	0.05	0.07	0.24	0.05	0.16
54	0.24	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.04	0.41	0.06	0.07	0.27	0.03	0.18
56	0.27	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.04	0.48	0.07	0.07	0.30	0.02	0.19
58	0.29	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.03	0.50	0.08	0.08	0.33	0.00	0.20
60	0.32	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.03	0.50	0.10	0.08	0.36	0.00	0.21
62	0.35	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.02	0.50	0.11	0.08	0.39	0.00	0.23
64	0.38	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.02	0.50	0.13	0.09	0.43	0.00	0.24
66	0.41	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.01	0.50	0.15	0.09	0.47	0.00	0.26
68	0.45	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.01	0.50	0.17	0.10	0.50	0.00	0.27
70	0.48	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.00	0.50	0.19	0.10	0.50	0.00	0.29
72	0.50	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.00	0.50	0.21	0.11	0.50	0.00	0.31
74	0.50	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.00	0.50	0.23	0.11	0.50	0.00	0.33

à la fois les tests de F et les valeurs respectives de R^2 , il est préférable d'utiliser un taux moyen de mortalité plutôt que les prédictions provenant de régressions déficientes. On évite ainsi des prédictions aberrantes pour des classes extrêmes de DHP.

Dans le cas des régressions satisfaisantes, il est utile d'étudier chacun des coefficients β_1 , β_2 et β_3 pour vérifier s'ils interviennent réellement dans la régression. Pour cela, il suffit de tester avec la statistique t de Student, l'hypothèse nulle $H_0 : \beta_i = 0$ contre l'hypothèse alternative $H_1 : \beta_i \neq 0$, pour i variant de 1 à 3.

Dans le cas du bouleau jaune, la statistique t de Student pour tester cette hypothèse a été calculée par le logiciel *STATGRAPHICS PLUS* respectivement à $t_{obs}(\beta_1) = 2,48$ et à $t_{obs}(\beta_2) = -1,81$ et à $(\beta_3) = 2,50$ (voir tableau 5.17). Comme, d'après les tables, $t_2(0,975) = 2,262$, le régresseur DHP² ne peut pas être éliminé mais, par contre, le régresseur DHP semble avoir une utilité très marginale. Pour les autres essences, on peut constater dans les tableaux 5.17 et 5.19 que pour toutes les essences où les valeurs de F_{obs} et les valeurs de R^2 sont faibles, les coefficients β_1 et/ou β_2 sont tous non significatifs en se référant à leur statistique t de Student respective. Dans le cas du

cerisier de Pennsylvanie (*Prunus pensylvanica* L.), même si les valeurs de R^2 et de F sont élevées, il convient d'être particulièrement prudent avec la régression étant donné que la pondération des taux de mortalité par le nombre de tiges vivantes a réduit le nombre de degrés de liberté à $(n-p) = 1$. En effet, le nombre de tiges vivantes est égal à zéro pour huit classes de DHP.

5.6 Résultats des régressions servant au lissage des taux par essence et par classe de DHP

Afin d'illustrer les résultats des équations de régression pour le lissage des taux de mortalité par essence et par classe de DHP, nous avons élaboré la matrice des taux prédits. Cette matrice est présentée au tableau 5.21 et elle est utilisée pour construire les figures 5.3 à 5.5. La matrice a été fabriquée à partir de la fonction « FAITMORT ». On peut retrouver cette dernière dans un rapport interne de la DRF (Carpentier 1995). Cette fonction, qui utilise des paramètres spécifiques à chacune des essences, a dû être contrainte, dans le cas de certaines espèces marginales, pour produire des résultats biologiquement acceptables. En effet, dans les cas du bouleau à papier et du sapin baumier, pour des DHP élevés, les taux de mortalité par classe de DHP ont été limités à un maximum de 50 % par décennie. Dans les cas de l'érable à sucre, du cerisier de Pennsylvanie et de l'épinette rouge, la fonction a été contrainte à 0 % de mortalité pour éviter des prédictions négatives de tiges mortes pour des DHP élevés. Pour y arriver, on s'est servi d'une fonc-

tion de base du langage informatique APL*PLUS III pour WINDOWS appelée « Zéro-plafond ». Cette fonction remplace les valeurs négatives par des zéros. Elle est également utilisée à la section 4.4 pour la prédiction du nombre de tiges recrues.

Dans le but de vérifier l'exactitude de la construction de la fonction de prédiction du nombre de tiges mortes, nous l'avons appliquée aux mêmes données qui ont servi à l'estimation de ses paramètres. Les résultats sont présentés au tableau 5.22. On y constate que les résultats sont satisfaisants dans l'ensemble même si, dans le cas présent, on s'est servi pour cette vérification de la durée de croissance de la période 1-2 pour les trois périodes analysées. Le problème le plus important que ce tableau dévoile, c'est que pour le sapin baumier, le niveau de mortalité prédit en période 1-2 et en période 3-4 est de beaucoup biaisé positivement, tandis que pour la période 2-3 le biais est encore plus important mais en sens opposé, c'est-à-dire négativement.

Au chapitre sept, qui traite de la validation des prédictions du logiciel *BOJRES*, nous verrons que les contraintes de limitations inférieure et supérieure, apportées à la fonction de prédiction *MORTDHP*, ne conduisent pas à des biais significatifs dans les prédictions pour un ensemble de placettes. Nous constaterons également que des variables supplémentaires pourraient rendre la composante mortalité plus explicative et efficace pour des prédictions locales, c'est-à-dire pour une essence dans une placette donnée.

Tableau 5.22 Vérification des prédictions de la mortalité par essence et par période de croissance dans les 101 placettes en utilisant la fonction de régression linéaire MORTDHP

ESSENCE	MORTALITÉ PÉRIODE 1-2		MORTALITÉ PÉRIODE 2-3		MORTALITÉ PÉRIODE 3-4		MORTALITÉ PÉRIODE 1-4	
	OBSERVÉE	PRÉDITE	OBSERVÉE	PRÉDITE	OBSERVÉE	PRÉDITE	OBSERVÉE	PRÉDITE
BOJ	44.00	44.20	17.00	15.22	0.00	0.00	61.00	59.42
BOP	10.00	9.88	4.00	3.63	0.00	0.00	14.00	13.51
ERS	3.00	3.47	2.00	1.34	0.00	0.00	5.00	4.81
ERR	16.00	17.07	3.00	2.81	1.00	1.01	20.00	20.89
PRP	3.00	2.83	2.00	3.25	0.00	0.00	5.00	6.08
SAB	116.00	111.34	71.00	75.02	0.00	0.00	187.00	186.37
EPB	7.00	7.55	4.00	3.59	0.00	0.00	11.00	11.15
EPR	4.00	3.64	0.00	0.00	0.00	0.00	4.00	3.64
THO	7.00	8.63	1.00	0.41	0.00	0.00	8.00	9.04
PRU	5.00	5.46	2.00	1.45	0.00	0.00	7.00	6.91
TOT	215.00	214.08	106.00	106.72	1.00	1.01	322.00	321.81

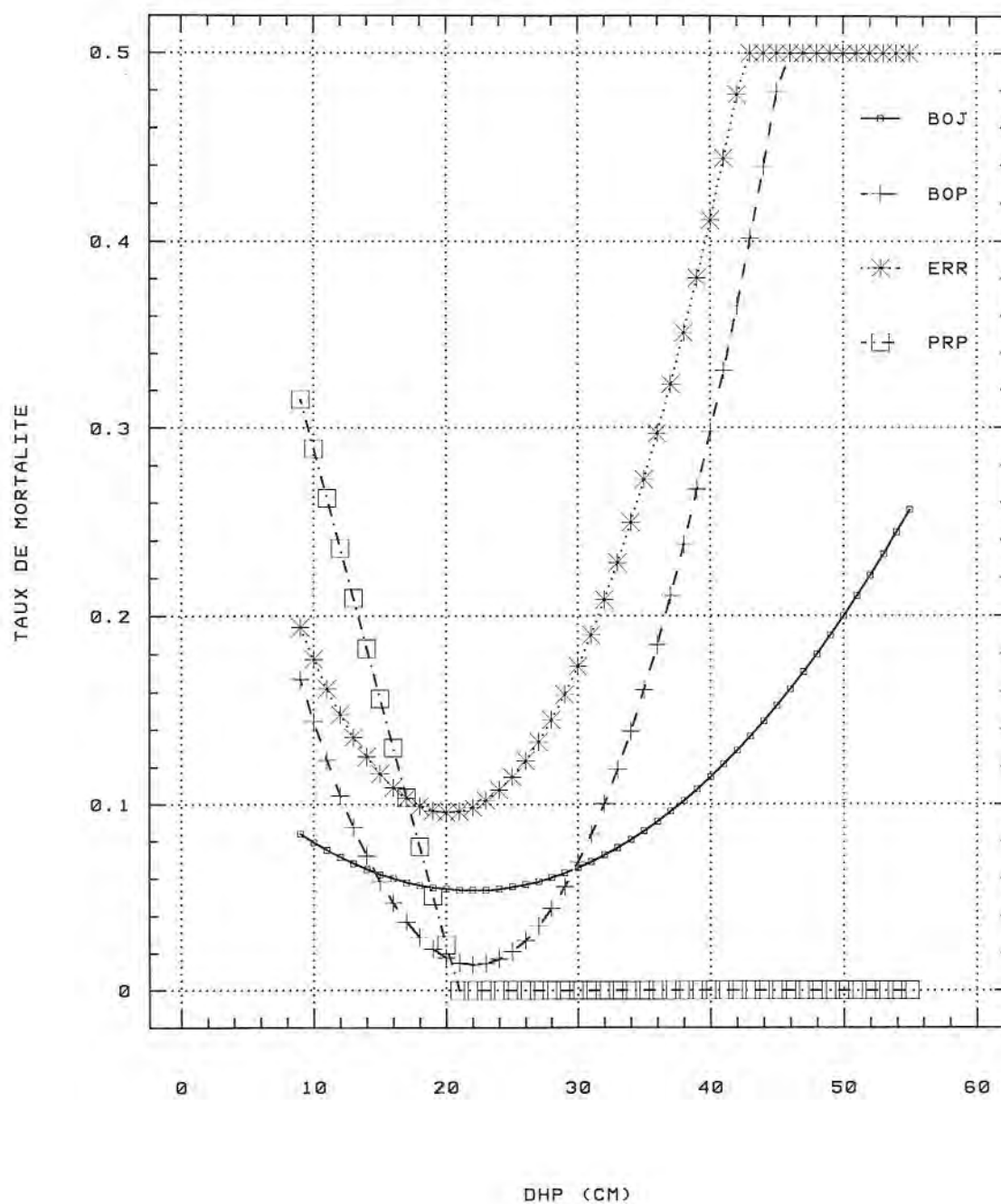


Figure 5.3. Taux décennaux de mortalité en fonction du DHP pour quatre essences feuillues.

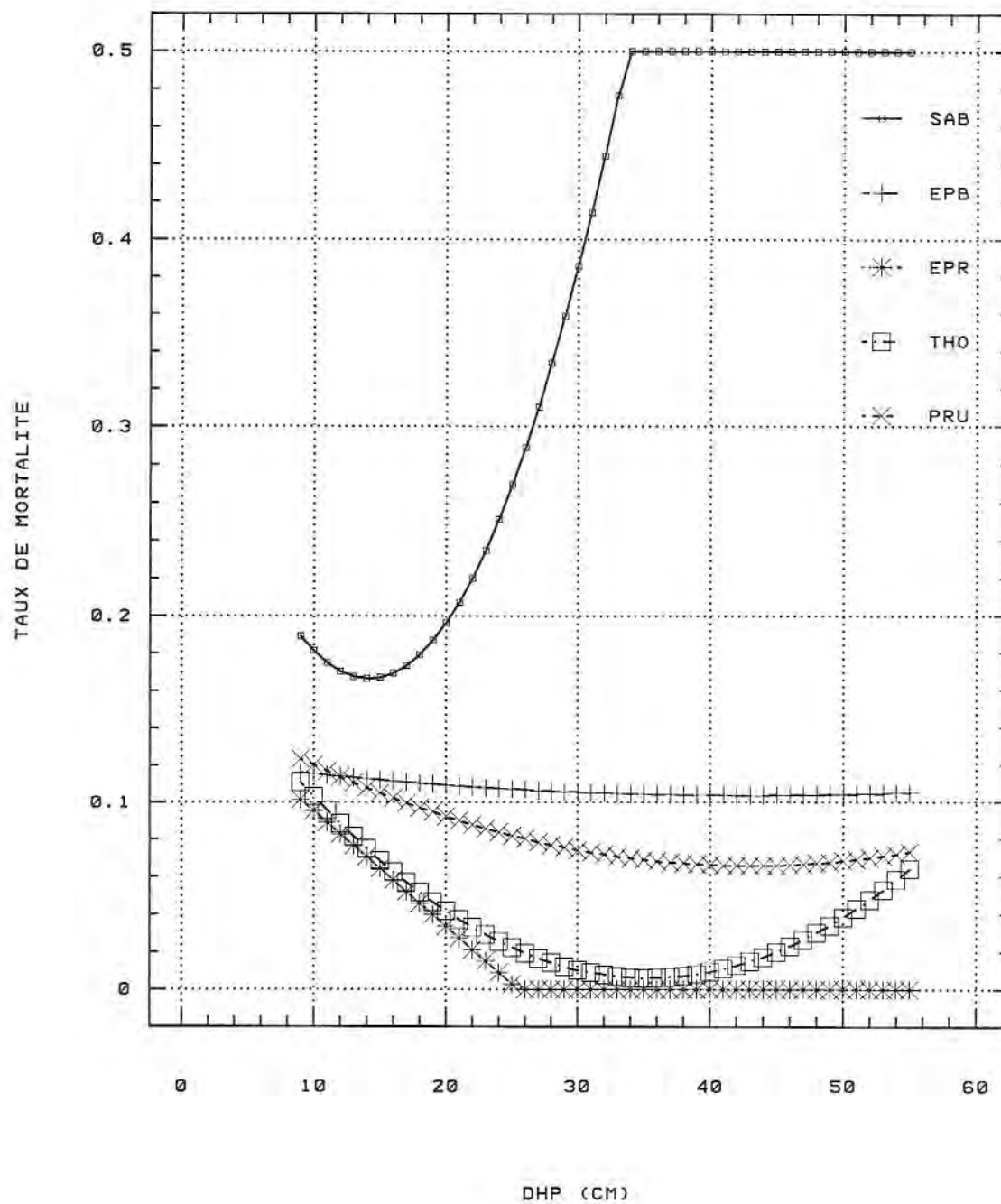


Figure 5.4. Taux décennaux de mortalité en fonction du DHP pour cinq essences résineuses.

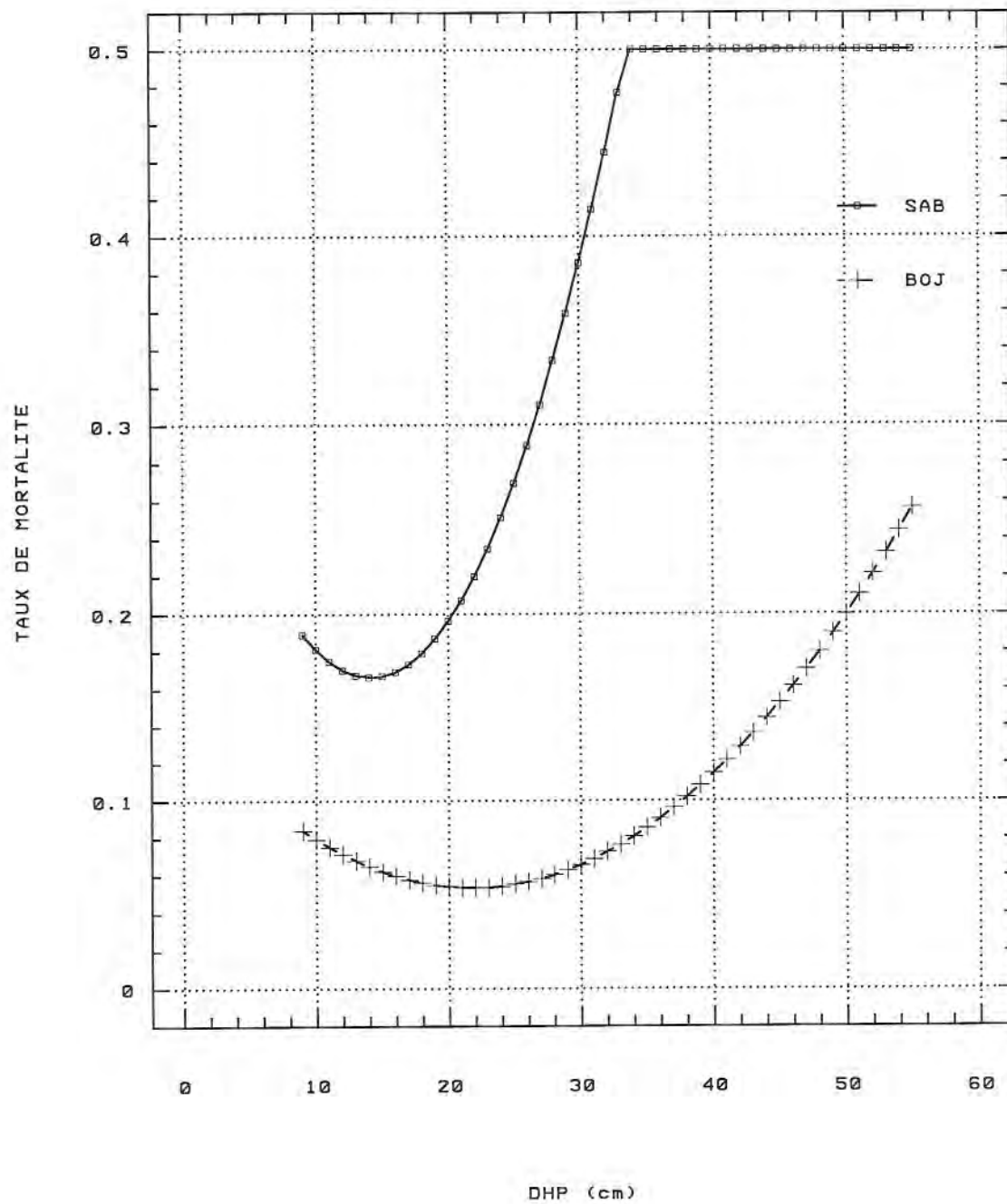


Figure 5.5. Taux décennaux de mortalité en fonction du DHP pour deux essences principales.

Chapitre six

Phénomène de l'accroissement

La croissance d'un arbre constitue un principe physiologique qui se doit d'être traduit en termes mathématiques afin de pouvoir être prédit pour en tirer le maximum de bénéfices économiques.

La croissance forestière correspond à une entité très vaste (croissance d'un arbre ou d'un peuplement, tant en diamètre qu'en hauteur) qui touche à de nombreux domaines connexes, dont, la dendrométrie, la physiologie, la sylviculture et l'économie. La compréhension physiologique et l'évaluation mathématique de la croissance deviennent cruciales pour une gestion forestière adéquate et rentable. La physiologie se spécialise dans la compréhension et dans l'illustration de la beauté biologique que dégage la croissance d'un arbre en particulier. Après quelques semaines de photopériode suffisamment longue, un simple bourgeon devient une pousse annuelle de plusieurs dizaines de centimètres (croissance primaire). Par la suite, cette pousse croîtra en diamètre à partir de son cambium (croissance secondaire). Il est évident que plusieurs facteurs tels la luminosité, l'eau, les nutriments, la compétition, pour ne nommer que ceux-là, modifient toute cette dynamique.

Dans une perspective plus globale, c'est-à-dire en analysant de nombreux individus (comme un peuplement), ce gain annuel de matière ligneuse peut être quantifié. Il est possible de créer des modèles qui permettent de prévoir avec précision la production ligneuse. On cherche donc à prédire l'avenir d'un peuplement en se basant sur son historique qui est résumé dans les banques de données d'inventaire forestier. Pour les peuplements équiennes, l'âge d'exploitabilité absolu peut être facilement calculé. La détermination de cet âge reste essentielle pour réaliser un aménagement rationnel, tout en minimisant les pertes et le gaspillage des ressources forestières. Cette compréhension mathématique de la croissance constitue la ligne directrice du présent document; celle-ci relève de la dendrométrie.

La cueillette de données dendrométriques (diamètre, âge, hauteur, densité) fiables constitue l'étape initiale. Par la suite, des outils mathématiques (régression) sont essentiels à l'élaboration de méthodes dendrométriques permettant d'estimer ou de prévoir tant la croissance que le rendement d'un peuplement. La table de production est un des outils les plus connus et les plus utilisés en matière de prédiction de la production de peuplements. La modélisation de la dynamique forestière forme un processus qui peut servir à la fabrication de ces tables. L'aménagement forestier peut être maximisé en se référant à de telles tables.

Que ce soit dans l'élaboration de tables de production ou dans la construction de modèles de croissance fiables (simulateurs), les mesures dendrométriques proviennent habituellement de peuplements équiennes, purs et stables. Ici, le but principal du chapitre vise la création de modèles mathématiques d'accroissement pouvant fonctionner à l'intérieur d'un certain type de peuplements inéquiennes mixtes : la bétulaie jaune à résineux.

6.1 Croissance des arbres individuels en diamètre et en surface terrière

Le module de la composante « accroissement des survivants » est basé sur la croissance de l'« arbre individuel » et non sur la croissance globale de tous les arbres du peuplement. Chaque tige sert d'élément unitaire faisant l'objet de la modélisation. Moser (1972), Ung *et al.* (1982), Somers et Farrar (1991) ont développé des modèles qui opèrent selon le « peuplement entier » et non selon les « arbres individuels » qui en forment pourtant la composante primaire. Hyink et Moser (1983), Solomon *et al.* (1986) et Carpentier (1987) ont plutôt travaillé sur des modèles hybrides entre « arbre individuel » et « peuplement entier », en répartissant la population globale de chacune des placettes, par classe de DHP plus ou moins large.

Nous cherchons à simuler la croissance et le rendement des tiges provenant de peuplements mélangés, lesquels sont composés de plusieurs essences croissant dans des placettes de dimensions très restreintes. Nous posons l'hypothèse que la modélisation de la croissance doit reposer sur l'arbre individuel et sur une base spécifique. Par spécifique, nous entendons d'une espèce donnée.

Pour les variables explicatives des modèles proposés, nous tiendrons compte de la vigueur des arbres par l'intermédiaire des variables individuelles. Cependant, des variables peuplements interviendront afin de tenir compte du facteur de compétition qui affecte différemment la dynamique de chaque espèce présente dans une placette.

6.2 Procédure de modélisation de la croissance diamétrale en deux étapes

Pour la modélisation de la croissance des arbres individuels, il demeure usuel chez plusieurs dendrométriciens (modélisateurs) des États-Unis, d'utiliser une procédure à deux étapes. Par cette façon de procéder, la croissance individuelle de chaque tige est prédite en multipliant une croissance potentielle spécifique par une fonction modificatrice dont le rôle est de réduire l'accroissement en fonction des contraintes spatio-temporelles :

$$\text{Croissance individuelle} = (\text{Croissance potentielle}) \times (\text{Fonction modificatrice}).$$

6.2.1 Détermination de la croissance potentielle

Dans un premier temps, cette procédure implique la définition d'une sous-population démontrant une croissance supérieure à partir de la population analysée. De cette sous-population, on établit une fonction de prédiction de croissance maximale. D'après Amateis, Burkhart et Burk (1986), la définition de cette sous-population d'arbres dits « exceptionnels » varie de quelques arbres qui croissent librement sans aucune compétition, jusqu'à une certaine proportion des tiges supérieures provenant de la population globale. Teck et Hilt (1991) ont divisé leur population étudiée en tenant compte à la fois de classes de diamètre et d'indices de qualité de la station. Dans chacun de ces groupes, les arbres ont été triés en fonction de leur croissance périodique moyenne. Ceux qui appartenaient au décile supérieur ont été sélectionnés pour former la sous-population supérieure. C'est à partir de ce groupe restreint que les auteurs ont développé leurs équations de croissance potentielle.

6.2.2 Détermination d'une fonction modificatrice

Dans un second temps, il s'agit d'expliquer les variations de croissance de chaque arbre par rapport à la croissance potentielle déterminée à la première étape. Les variables explicatives utilisées réfèrent habituellement à la vigueur de l'arbre et à la compétition. À partir de variables explicatives pertinentes, une valeur est estimée pour la fonction modificatrice (en anglais : *modifier*) ; cette dernière se trouve comprise entre 0 et 1. À l'instar de Quicke *et al.* (1994), nous n'utiliserons pas cette procédure à deux étapes et cela pour trois raisons. Premièrement, le groupe d'arbres exceptionnels est toujours sélectionné d'une manière arbitraire. En effet, la sélection repose sur l'hypothèse que les arbres exceptionnels représentent la croissance maximale. Si on définit ce maximum comme étant la croissance moyenne des tiges supérieures (10 % de la population), on peut déjà supposer que la moitié de ces tiges à croissance exceptionnellement élevée possèdent une croissance supérieure à la moyenne de la sous-population de ces dites tiges. Deuxièmement, comment faire la distinction entre des tiges aberrantes (*outliers*) et d'autres réellement exceptionnelles, étant donné que nos expériences passées ont démontré que les données sont rarement exemptes d'erreurs. Il semble imprudent de construire une équation de référence à partir de la portion des données présentant des niveaux d'accroissement parfois surprenants. Troisièmement, les coefficients des deux modèles de régression différents ne sont pas obtenus simultanément. À ce moment, il devient très difficile d'estimer les propriétés statistiques des deux équations simultanément.

Pour ces raisons, nous préférons utiliser une procédure à une seule étape dans laquelle les coefficients sont estimés simultanément. Ainsi, nous tenterons d'expliquer les variations observées de croissance individuelle par rapport à la moyenne réelle de l'échantillon complet plutôt que les variations par rapport à un maximum théorique.

6.2.3 Structure de la variable dépendante du module de croissance

La base fondamentale de tout simulateur forestier opérant à partir de composantes est le module de croissance. Sa conception repose sur des analyses graphiques et sur des hypothèses théoriques, tant sur les variables explicatives que sur la variable expliquée elle-même, c'est-à-dire la croissance diamétrale ou la croissance en surface terrière. Le développement s'appuie également sur des tests statistiques quantifiant l'ajustement des équations aux observations de base. De plus, les résultats du travail sont valables à

la condition que les prédictions soient biologiquement acceptables autant au niveau de l'arbre qu'au niveau du peuplement.

Dans les placettes-échantillons permanentes du SIF, l'accroissement diamétral est estimé indirectement. Les variables dépendantes mesurées sur le terrain sont les DHP au temps 2, ces derniers sont habituellement plus grands que ceux mesurés au temps 1. La différence entre les deux mesures divisée par la durée entre les deux dates d'observations se nomme l'accroissement diamétral annuel moyen.

$$ACC_{DHP} = \frac{DHP_2 - DHP_1}{DATE_2 - DATE_1} \quad (6.1)$$

Cet accroissement est estimé par le DHP mesuré au millimètre près pour chacun des arbres. On cherche à expliquer les variations d'un arbre à l'autre au moyen des variables explicatives qui proviennent tant de l'arbre lui-même que de l'ensemble des tiges marchandes de la placette.

De nombreux auteurs dont Quicke *et al.* (1994) ont préféré modéliser une variante de cet accroissement. Ces auteurs, comme bien d'autres, ont plutôt choisi de modéliser l'accroissement en surface terrière marchande calculée selon l'une ou l'autre des deux équations suivantes :

$$ACC_{stm} = \frac{STM_2 - STM_1}{DATE_2 - DATE_1}$$

ou encore

$$ACC_{stm} = \frac{\pi/4 [(DHP + ACC_{DHP})^2 - DHP^2]}{DATE_2 - DATE_1} \quad (6.2)$$

Quicke *et al.* ont trouvé des relations entre les variables explicatives et l'accroissement en surface terrière qui s'ajustaient bien avec des formes de modèles biologiquement raisonnables. Cependant, d'après West (1980), il n'y a aucune raison d'utiliser l'avenue plus complexe de l'accroissement en surface terrière plutôt que celle de l'accroissement en diamètre. Par conséquent, chacune sera explorée.

6.3 L'accroissement diamétral annuel moyen et ses variables explicatives

Dans le but d'estimer des taux d'accroissement diamétral en fonction du DHP, la fonction *APL*, *AGLOBAL*, présentée dans un rapport interne de la DRF (Carpentier 1995), produit des matrices de données observées. Cette fonction examine la liste des arbres par placette, par essence et par mesure, afin d'extraire les matrices des observations.

6.3.1 Variables potentielles pour prédire l'accroissement individuel

Le tableau 6.1 réfère à l'accroissement individuel et aux variables explicatives des 50 premières tiges de bouleau jaune contenues dans les 101 placettes. Cette matrice comprend 871 lignes, chacune correspond à une tige. La matrice s'étend sur 19 colonnes. La signification des acronymes servant à identifier sommairement les 18 colonnes montrées au tableau 6.1 apparaît ci-dessous. Les acronymes sont listés dans l'ordre où ils apparaissent dans les matrices de données. Par souci de brièveté, nous ne montrons pas le début des neuf autres matrices référant aux autres essences étudiées

NL :	numéro de la ligne correspondant à une tige d'une essence donnée. Celui-ci provient de la matrice globale des 3 030 lignes qui réfère aux 101 placettes, aux 10 essences et aux quatre mesures.
ACCR :	accroissement diamétral au DHP calculé sur une base annuelle et exprimé en cm.
DHP :	diamètre à hauteur de poitrine, exprimé en cm.
STS :	surface terrière supérieure en m ² /0,04 hectare (voir la section 2.4.6 pour connaître sa définition et le processus pour la calculer).
DHPM :	DHP moyen estimé par la moyenne quadratique des DHP des tiges marchandes d'une placette, toutes essences confondues. Il est exprimé en cm.
RDHP :	rapport entre le DHP d'une tige et le DHPM de la placette, obtenu en divisant les valeurs de la colonne 3 par celles de la colonne 5. Cette variable est commentée dans la section 2.4.7.
STM :	surface terrière marchande de la placette toutes essences confondues, en m ² /0,04 hectare.

Tableau 6.1 Variables concernant l'accroissement diamétral sur une base annuelle pour la période 1-2 pour l'essence BOJ

NL	ACCR	DHP	STS	DHPM	RDHP	STM	HDC	HET	NTM	ID	IQS	AMDC	IQST	PF	NA	ME	DUR
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	18	19
3	0.31	22.1	0.4	20.7	1.1	0.6	14.8	16.6	20	0.7	1.0	0.4	14.3	0.7	3	1	7.36
7	0.34	20.3	0.4	20.7	1.0	0.6	14.8	16.6	20	0.7	1.0	0.4	14.3	0.7	7	1	7.36
8	0.38	11.2	0.6	20.7	0.5	0.6	14.8	10.2	20	0.7	1.0	0.4	14.3	0.7	8	1	7.36
9	0.16	32.3	0.0	20.7	1.6	0.6	14.8	16.6	20	0.7	1.0	0.4	14.3	0.7	9	1	7.36
10	0.41	10.2	0.6	20.7	0.5	0.6	14.8	10.2	20	0.7	1.0	0.4	14.3	0.7	10	1	7.36
13	0.11	23.4	0.3	20.7	1.1	0.6	14.8	16.6	20	0.7	1.0	0.4	14.3	0.7	13	1	7.36
14	0.04	13.7	0.6	20.7	0.7	0.6	14.8	10.2	20	0.7	1.0	0.4	14.3	0.7	14	1	7.36
15	0.08	25.9	0.2	20.7	1.3	0.6	14.8	16.6	20	0.7	1.0	0.4	14.3	0.7	15	1	7.36
17	0.46	29.7	0.2	20.7	1.4	0.6	14.8	16.6	20	0.7	1.0	0.4	14.3	0.7	17	1	7.36
19	0.41	31.8	0.1	20.7	1.5	0.6	14.8	16.6	20	0.7	1.0	0.4	14.3	0.7	19	1	7.36
29	0.16	10.7	0.4	15.5	0.7	0.5	13.4	12.4	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	2	1	8.37
30	0.31	10.5	0.4	15.5	0.7	0.5	13.4	12.4	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	3	1	8.37
32	0.36	12.5	0.3	15.5	0.8	0.5	13.4	12.4	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	5	1	8.37
33	0.23	9.1	0.5	15.5	0.6	0.5	13.4	9.2	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	6	1	8.37
36	0.36	14.0	0.2	15.5	0.9	0.5	13.4	12.4	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	9	1	8.37
37	0.13	9.9	0.4	15.5	0.6	0.5	13.4	12.4	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	10	1	8.37
38	0.20	12.0	0.4	15.5	0.8	0.5	13.4	12.4	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	11	1	8.37
39	0.37	11.7	0.4	15.5	0.8	0.5	13.4	12.4	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	12	1	8.37
47	0.18	10.0	0.4	15.5	0.6	0.5	13.4	12.4	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	20	1	8.37
48	0.23	11.4	0.4	15.5	0.7	0.5	13.4	12.4	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	21	1	8.37
52	0.17	11.1	0.4	15.5	0.7	0.5	13.4	9.2	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	25	1	8.37
54	0.20	12.1	0.3	15.5	0.8	0.5	13.4	12.4	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	27	1	8.37
55	0.24	9.6	0.5	15.5	0.6	0.5	13.4	9.2	27	0.7	1.0	0.3	17.8	0.4	28	1	8.37
66	0.23	28.5	0.7	26.4	1.1	1.1	19.0	21.3	23	1.1	1.1	0.1	15.4	0.5	2	1	7.23
74	0.10	48.3	0.0	26.4	1.8	1.1	19.0	21.3	23	1.1	1.1	0.1	15.4	0.5	10	1	7.23
93	0.44	37.9	0.2	21.6	1.8	1.2	17.7	19.9	38	1.4	1.1	0.2	16.4	0.5	4	1	7.54
106	0.20	27.9	0.6	21.6	1.3	1.2	17.7	19.9	38	1.4	1.1	0.2	16.4	0.5	17	1	7.54
110	0.23	44.9	0.0	21.6	2.1	1.2	17.7	19.9	38	1.4	1.1	0.2	16.4	0.5	21	1	7.54
113	0.16	33.8	0.3	21.6	1.6	1.2	17.7	19.9	38	1.4	1.1	0.2	16.4	0.5	24	1	7.54
121	0.21	28.8	0.5	21.6	1.3	1.2	17.7	19.9	38	1.4	1.1	0.2	16.4	0.5	32	1	7.54
123	0.05	20.6	0.9	21.6	1.0	1.2	17.7	16.4	38	1.4	1.1	0.2	16.4	0.5	34	1	7.54
125	0.20	20.0	0.9	21.6	0.9	1.2	17.7	16.4	38	1.4	1.1	0.2	16.4	0.5	36	1	7.54
127	0.34	20.8	0.9	21.6	1.0	1.2	17.7	16.4	38	1.4	1.1	0.2	16.4	0.5	38	1	7.54
130	0.32	18.0	1.0	21.6	0.8	1.2	17.7	16.4	38	1.4	1.1	0.2	16.4	0.5	41	1	7.54
149	0.18	33.8	0.2	19.5	1.7	1.0	17.2	19.3	38	1.4	1.1	0.2	18.2	0.6	8	1	8.27
155	0.04	34.6	0.1	19.5	1.8	1.0	17.2	19.3	38	1.4	1.1	0.2	18.2	0.6	14	1	8.27
180	0.18	23.3	0.5	19.5	1.2	1.0	17.2	15.9	38	1.4	1.1	0.2	18.2	0.6	39	1	8.27
195	0.21	45.8	0.4	26.2	1.7	1.3	16.6	18.6	30	1.4	1.2	0.3	17.4	0.6	10	1	8.27
201	0.05	49.0	0.0	26.2	1.9	1.3	16.6	18.6	30	1.4	1.2	0.3	17.4	0.6	17	1	8.27
202	0.21	14.3	1.2	26.2	0.5	1.3	16.6	11.5	30	1.4	1.2	0.3	17.4	0.6	18	1	8.27
206	0.17	9.3	1.3	26.2	0.4	1.3	16.6	11.5	30	1.4	1.2	0.3	17.4	0.6	22	1	8.27
210	0.21	16.2	1.2	26.2	0.6	1.3	16.6	15.4	30	1.4	1.2	0.3	17.4	0.6	26	1	8.27
216	0.18	48.4	0.2	26.2	1.8	1.3	16.6	18.6	30	1.4	1.2	0.3	17.4	0.6	32	1	8.27
218	0.15	39.6	0.3	27.7	1.4	1.2	20.6	19.1	24	1.2	1.2	0.2	17.6	0.6	1	1	8.27
220	0.35	39.1	0.6	27.7	1.4	1.2	20.6	23.1	24	1.2	1.2	0.2	17.6	0.6	3	1	8.27
221	0.17	10.9	1.2	27.7	0.4	1.2	20.6	11.5	24	1.2	1.2	0.2	17.6	0.6	5	1	8.27
222	0.10	13.7	1.2	27.7	0.5	1.2	20.6	14.2	24	1.2	1.2	0.2	17.6	0.6	6	1	8.27
223	0.27	21.3	0.9	27.7	0.8	1.2	20.6	19.1	24	1.2	1.2	0.2	17.6	0.6	13	1	8.27
225	0.17	18.2	1.1	27.7	0.7	1.2	20.6	19.1	24	1.2	1.2	0.2	17.6	0.6	15	1	8.27
226	0.10	15.1	1.2	27.7	0.5	1.2	20.6	14.2	24	1.2	1.2	0.2	17.6	0.6	16	1	8.27
227	0.16	20.3	1.0	27.7	0.7	1.2	20.6	19.1	24	1.2	1.2	0.2	17.6	0.6	17	1	8.27
237	0.16	19.3	1.0	27.7	0.7	1.2	20.6	19.1	24	1.2	1.2	0.2	17.6	0.6	31	1	8.27
248	0.32	22.9	0.0	18.3	1.3	0.3	15.3	17.1	12	0.4	1.0	0.4	13.9	0.7	7	1	8.43
249	0.33	22.7	0.1	18.3	1.2	0.3	15.3	14.1	12	0.4	1.0	0.4	13.9	0.7	8	1	8.43
250	0.56	17.2	0.2	18.3	0.9	0.3	15.3	14.1	12	0.4	1.0	0.4	13.9	0.7	9	1	8.43

HDC :	hauteur moyenne en mètres, des dominants et des codominants choisis comme arbres-échantillons de chaque placette.
HET :	hauteur moyenne en mètres, déterminée en fonction de l'étage de chacune des tiges et de la hauteur dominante de la placette.
NTM :	nombre de tiges marchandes de la placette pour toutes les essences confondues.
ID :	indice de densité de la placette (voir la section 2.4.5 pour connaître la définition et son estimation).
IQS :	indice de qualité de station.
AMDC :	accroissement diamétral au DHP estimé sur une base annuelle par la moyenne des accroissements individuels des cinq plus grosses tiges dominantes ou codominantes de chaque placette.
IQST :	indice de qualité de station déterminé selon la méthode de Huang <i>et al.</i> (1993).
PF :	proportion de la surface terrière marchande de la placette occupée par les tiges d'essences feuillues.
NA :	numéro de l'arbre servant à identifier la tige dans sa placette et pouvant être retrouvé physiquement sur le terrain.
ME :	numéro de la mesure.
DUR :	durée en années et fraction d'année de croissance, correspondant à la différence entre deux dates d'observations d'une période de croissance donnée (voir la section 2.4.4 pour connaître la méthode d'estimation).

6.3.2 Compilation de l'accroissement diamétral par essence pour trois périodes de croissance

Des statistiques concernant l'accroissement diamétral annuel peuvent être tirées des matrices de données dont une partie apparaît dans le tableau 6.1. Pour chacune des essences, nous avons calculé le nombre d'observations, l'accroissement diamétral

annuel avec l'écart type et le coefficient de variation, ainsi que ses valeurs minimales et maximales. Les résultats de ces calculs apparaissent au tableau 6.2.

L'accroissement diamétral annuel diffère peu d'une essence à l'autre; par contre, il varie beaucoup entre les tiges d'une même essence. On le constate par les valeurs élevées (environ 60 %) des coefficients de variations associés aux accroissements moyens. Il y a donc une très grande variation des accroissements. Dans le cas du bouleau jaune, la tige qui croît le plus en DHP présente un rythme de croissance 91 fois supérieure à celle la moins performante. Nous verrons à la section 6.5 traitant des régressions pour estimer l'accroissement individuel, que ces variations sont difficiles à expliquer par les régresseurs actuellement disponibles.

Sur les figures 6.1 et 6.2, on visualise les distributions des accroissements diamétraux observés pour le bouleau jaune et le sapin baumier. Ces distributions sont fortement asymétriques. Pour les autres essences à effectifs plus réduits, les surfaces de polygone sont plus anguleuses mais la forme générale rappelle la distribution gaussienne avec une asymétrie à droite. Nous ne les montrons par souci de brièveté.

6.3.3 Régression de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale

Ces matrices sont ensuite transférées au progiciel *STATGRAPHICS PLUS* en vue d'estimer les coefficients d'une équation permettant de prédire l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP initial seulement.

Le modèle d'équation retenu est le suivant :

$$ACC_{DHP} = \beta_1 (DHP)^{\beta_2} (\beta_3^{DHP}) + \varepsilon \quad (6.3)$$

Le module de régression non linéaire de *STATGRAPHICS PLUS* a été utilisé pour estimer les paramètres β_i . Ces derniers de même que les tests statistiques qui leur correspondent, sont montrés dans les tableaux 6.3 à 6.6.

Pour expliquer les faibles valeurs d'ajustement, nous joignons les figures 6.3 à 6.12 qui montrent la forte dispersion des accroissements pour les principales essences des bétulaies jaunes à résineux. L'examen des figures montre la grande dispersion dans des peuplements mélangés présentant souvent une structure inéquienne. Quel que soit le DHP, certains arbres sont très vigoureux tandis que d'autres agonisent. Dans le cas d'un modèle « arbre individuel », on chercherait à prédire la croissance de chaque individu, mais ici, on vise plutôt à déterminer un taux de crois-

Tableau 6.2 Statistiques descriptives de l'accroissement diamétral sur une base annuelle pour les dix essences principales

ESSENCE	NOMBRE OBSERVATIONS	ACCR MOYEN (cm)	ÉCART TYPE (cm)	COEFFICIENT VARIATION (%)	MINIMUM (cm)	MAXIMUM (cm)
BOJ	871	0.2523	0.1503	59.60	0.0097	0.8857
BOP	201	0.2453	0.1231	50.30	0.0147	0.5746
ERS	113	0.2603	0.1365	52.66	0.0242	0.5991
ERR	181	0.2699	0.1858	69.04	0.0147	1.1271
PRP	33	0.2812	0.1726	62.33	0.0443	0.7129
SAB	1020	0.2119	0.1445	68.19	0.0117	1.0406
EPB	135	0.2500	0.1614	64.79	0.0119	0.6450
EPR	76	0.1887	0.1251	66.73	0.0072	0.5614
THO	240	0.2019	0.1046	51.90	0.0137	0.5385
PRU	87	0.2182	0.1284	59.17	0.0133	0.7537

sance par classe de DHP. La faiblesse des valeurs des statistiques d'ajustement R^2 s'avère donc moins importante.

De plus, il y a deux tendances intéressantes à signaler à l'examen des figures 6.3 à 6.12. Premièrement, pour les faibles DHP, il y a beaucoup d'arbres opprimés qui démontrent un faible niveau d'accroissement. Deuxièmement, pour les forts DHP, on observe des tiges qui bénéficient d'un statut dominant et elles présentent de bons accroissements. Par contre, on observe aussi des accroissements plutôt faibles étant donné la sénescence de plusieurs tiges atteignant ces niveaux de DHP.

6.3.4 Vérification de l'équation de prédiction de l'accroissement en fonction du DHP

Après avoir régressé les accroissements en diamètre sur une base de cinq ans, en fonction du DHP, les coefficients montrés aux tableaux 6.3 et 6.5 sont intégrés dans une matrice appelée *MPACCDHP*. L'équation 6.3, appelée *CAC* en langage *APL*, et ses coefficients sont vérifiés pour assurer le réalisme de la conception et l'exactitude de la programmation. Le tableau 6.7 est élaboré pour cette raison à partir de la fonction *VERIACCR* présentée dans un rapport interne de la Direction de la recherche forestière (Carpentier 1995).

L'équation 6.3 est testée avec les matrices d'accroissement de chaque essence dont la forme générale est présentée pour le bouleau jaune au tableau 6.1. La variable explicative DHP apparaissant en colonne 3 représente le DHP initial mesuré sur le terrain au mm près. La variable dépendante, soit l'accroissement diamétral annuel, est également mesurée au mm près. Les colonnes intitulées « ACCROISSEMENT OBSERVÉ » sont de simples sommations des valeurs observées mais réparties par essence, pour les périodes 1-2, 2-3, 3-4 et pour l'ensemble des périodes de croissance (1-4). Les colonnes intitulées « ACCROISSEMENT PRÉDIT » sont également des sommations des valeurs prédites par l'équation 6.1. Les prédictions quinquennales sont rame-nées sur une base annuelle pour une comparaison directe. Les résultats sont également répartis par essence et par période d'observation au tableau 6.7.

L'équation 6.3 régie par sa matrice (10 lignes et trois colonnes) de 30 coefficients, dont trois par essence, procure des résultats globaux pratiquement sans biais importants pour chacune des essences. Si les valeurs prédites ne sont pas parfaitement identiques aux observations, il ne faut pas trop s'en inquiéter. En effet, les coefficients ont été estimés par régression non linéaire, cette procédure itérative conduit souvent à un biais (positif ou négatif) habituellement non significatif.

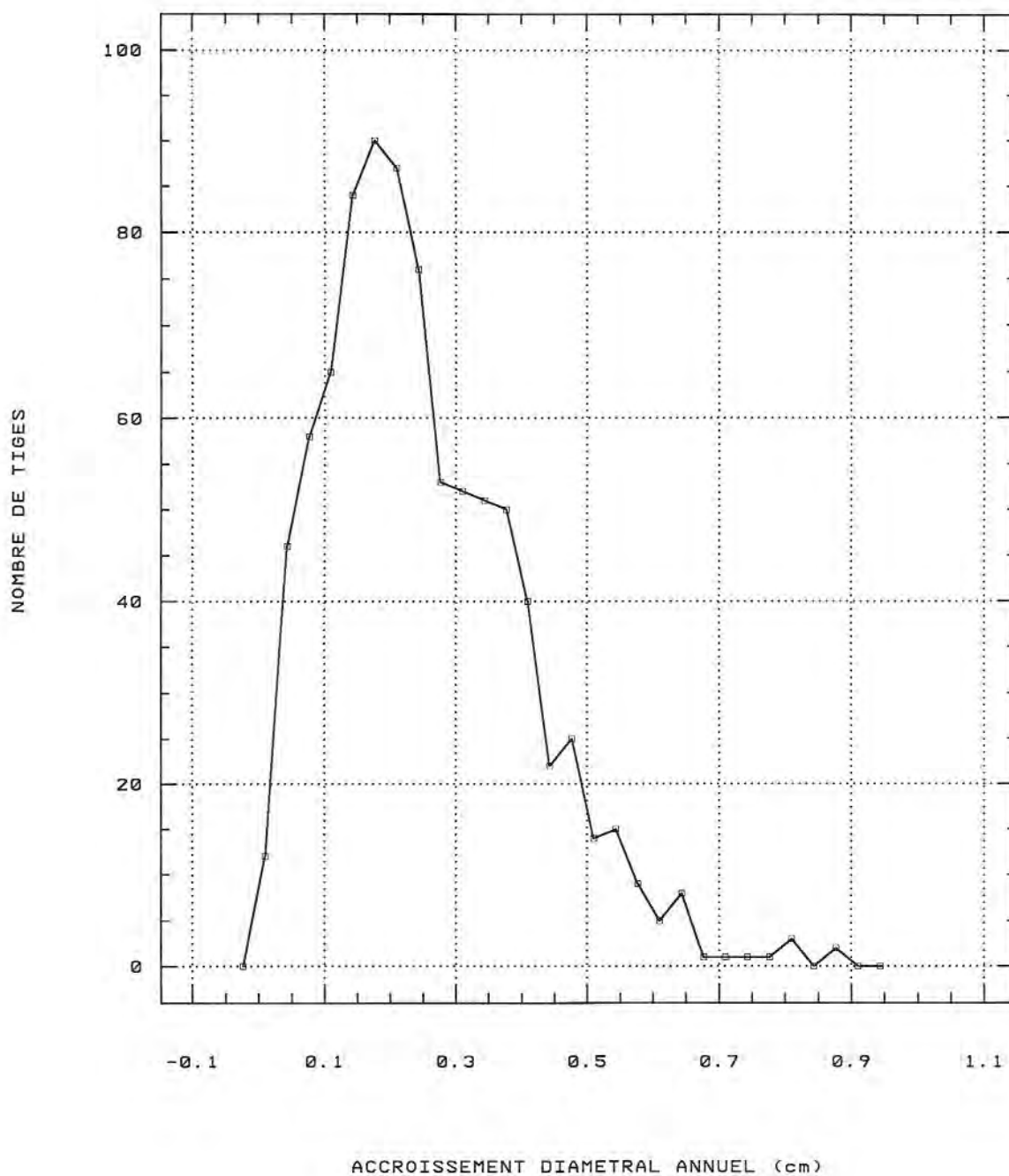


Figure 6.1. Polygone de fréquence de la variable dépendante ACCR diamétral annuel pour le bouleau jaune.

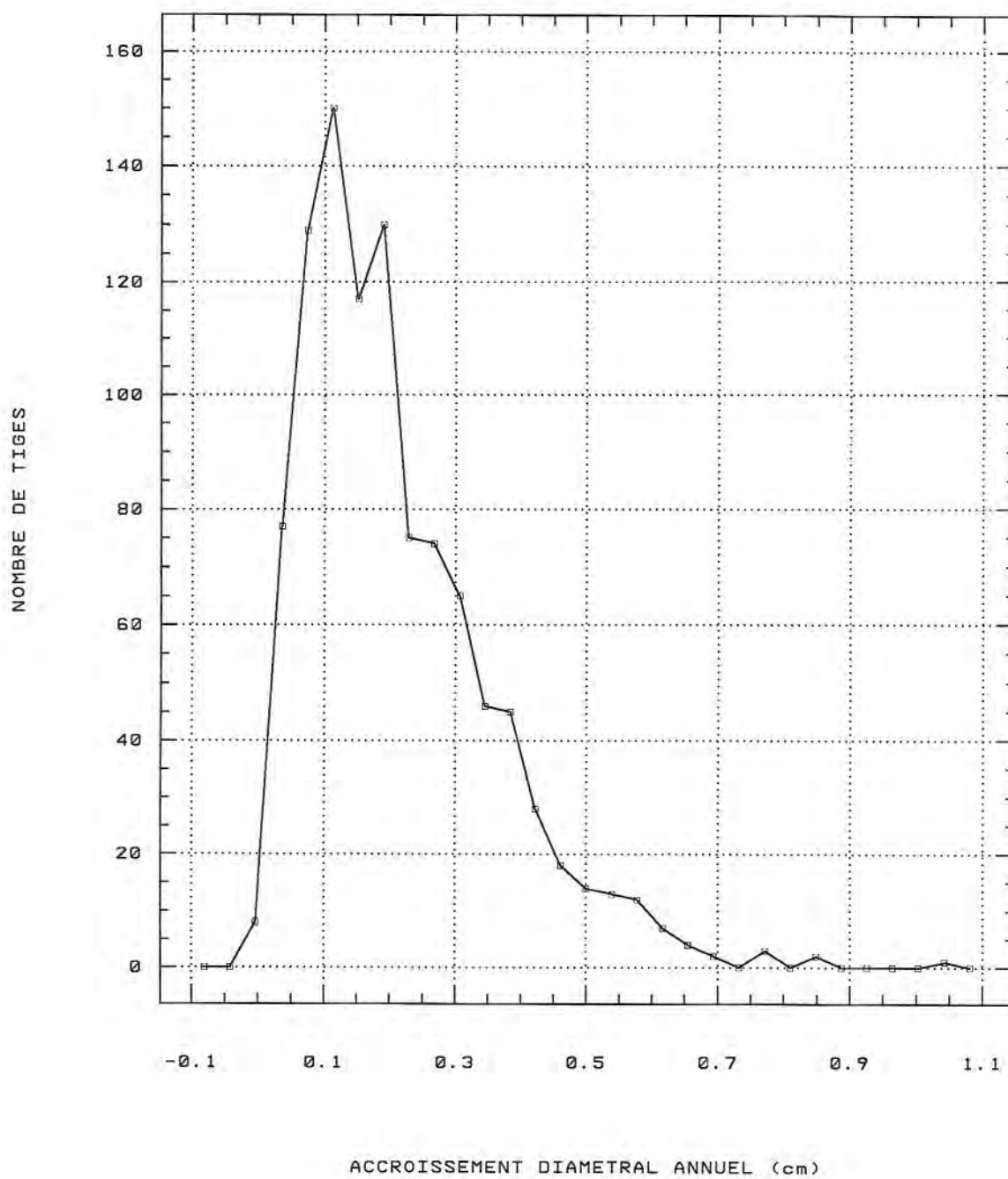


Figure 6.2. Polygone de fréquence de la variable dépendante ACCR diamétral annuel pour le sapin baumier.

Tableau 6.3. Coefficients des régressions non linéaires pour l'accroissement quinquennal du diamètre en fonction du DHP, pour les essences feuillues

Essence : bouleau jaune

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	0,293971	0,094197	3,121
β_2	0,721376	0,142998	5,045
β_3	0,968987	0,004695	206,368

Essence : bouleau à papier

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	0,236821	0,186343	1,270
β_2	0,955866	0,402835	2,372
β_3	0,942634	0,018248	51,654

Essence : érable à sucre

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	0,611934	0,539529	1,134
β_2	0,351595	0,429120	0,819
β_3	0,987809	0,016487	59,912

Essence : érable rouge

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	0,178912	0,237161	0,754
β_2	1,084308	0,691713	1,567
β_3	0,943988	0,032074	29,430

Essence : cerisier de Pennsylvanie

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	0,003152	0,014758	0,213
β_2	0,892017	2,694521	1,444
β_3	0,749298	0,137491	5,449

Tableau 6.4. Tables d'analyse de la variance pour les régressions non linéaires de l'accroissement quinquennal du diamètre en fonction du DHP, pour les essences feuillues

Essence : bouleau jaune

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	1396,4845	3	465,4948	839,330
Erreur	481,3949	868	0,5546	
Total	1877,8794	871		
Total (corr.)	491,7736	870		
$R^2 = 0,0211$				

Essence : bouleau à papier

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	304,7293	3	101,5764	272,202
Erreur	73,8866	198	0,3731	
Total	378,6160	201		
Total (corr.)	76,1419	200		
$R^2 = 0,0296$				

Essence : érable à sucre

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	192,0584	3	64,0195	135,270
Erreur	52,0597	110	0,4732	
Total	244,1182	113		
Total (corr.)	52,6372	112		
$R^2 = 0,0110$				

Essence : érable rouge

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	331,2055	3	110,4018	127,186
Erreur	154,5091	178	0,8680	
Total	485,7146	181		
Total (corr.)	156,2004	180		
$R^2 = 0,0108$				

Essence : cerisier de Pennsylvanie

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	67,0311	3	22,3437	29,422
Erreur	22,7821	30	0,7594	
Total	89,8132	33		
Total (corr.)	24,5784	32		
$R^2 = 0,0731$				

Tableau 6.5. Coefficients des régressions non linéaires pour l'accroissement quinquennal du diamètre en fonction du DHP, pour les essences résineuses

Essence : sapin baumier

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	0,02728	0,01522	1,786
β_2	1,69894	0,28534	5,954
β_3	0,94265	0,01329	70,879

Essence : épinette blanche

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	0,00675	0,00642	1,052
β_2	2,34746	0,40539	5,790
β_3	0,92134	0,01270	72,490

Essence : épinette rouge

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	0,04539	0,07194	0,631
β_2	1,25547	0,74556	1,683
β_3	0,97211	0,02916	33,327

Essence : thuya occidental

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	0,408890	0,205301	1,992
β_2	0,377377	0,213779	1,765
β_3	0,989300	0,006430	153,840

Essence : pruche du Canada

Nom du coefficient	Estimé	Écart type	t
β_1	0,758558	0,515438	1,472
β_2	0,005574	0,275198	0,020
β_3	1,011368	0,006230	162,335

Tableau 6.6. Tables d'analyse de la variance pour les régressions non linéaires de l'accroissement quinquennal du diamètre en fonction du DHP, pour les essences résineuses

Essence : sapin baumier

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	1210,7320	3	403,5773	879,215
Erreur	466,8233	1017	0,4590	
Total	1677,5553	1020		
Total (corr.)	532,1113	1019		
$R^2 = 0,1227$				

Essence : épinette blanche

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	230,7635	3	76,921	149,083
Erreur	68,1069	132	0,5159	
Total	298,8704	135		
Total (corr.)	87,9118	134		
$R^2 = 0,2253$				

Essence : épinette rouge

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	72,9463	3	24,3154	72,692
Erreur	24,4183	73	0,3344	
Total	97,3646	76		
Total (corr.)	29,7217	75		
$R^2 = 0,1784$				

Essence : thuya occidental

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	245,6105	3	81,8701	300,388
Erreur	64,5938	237	0,2725	
Total	310,2044	240		
Total (corr.)	65,6107	239		
$R^2 = 0,0155$				

Essence : pruche du Canada

Source	Somme des carrés	DL	Carré moyen	F
Modèle	108,4689	3	36,1563	98,129
Erreur	30,9501	84	0,36845	
Total	139,4190	87		
Total (corr.)	35,8424	86		
$R^2 = 0,1365$				

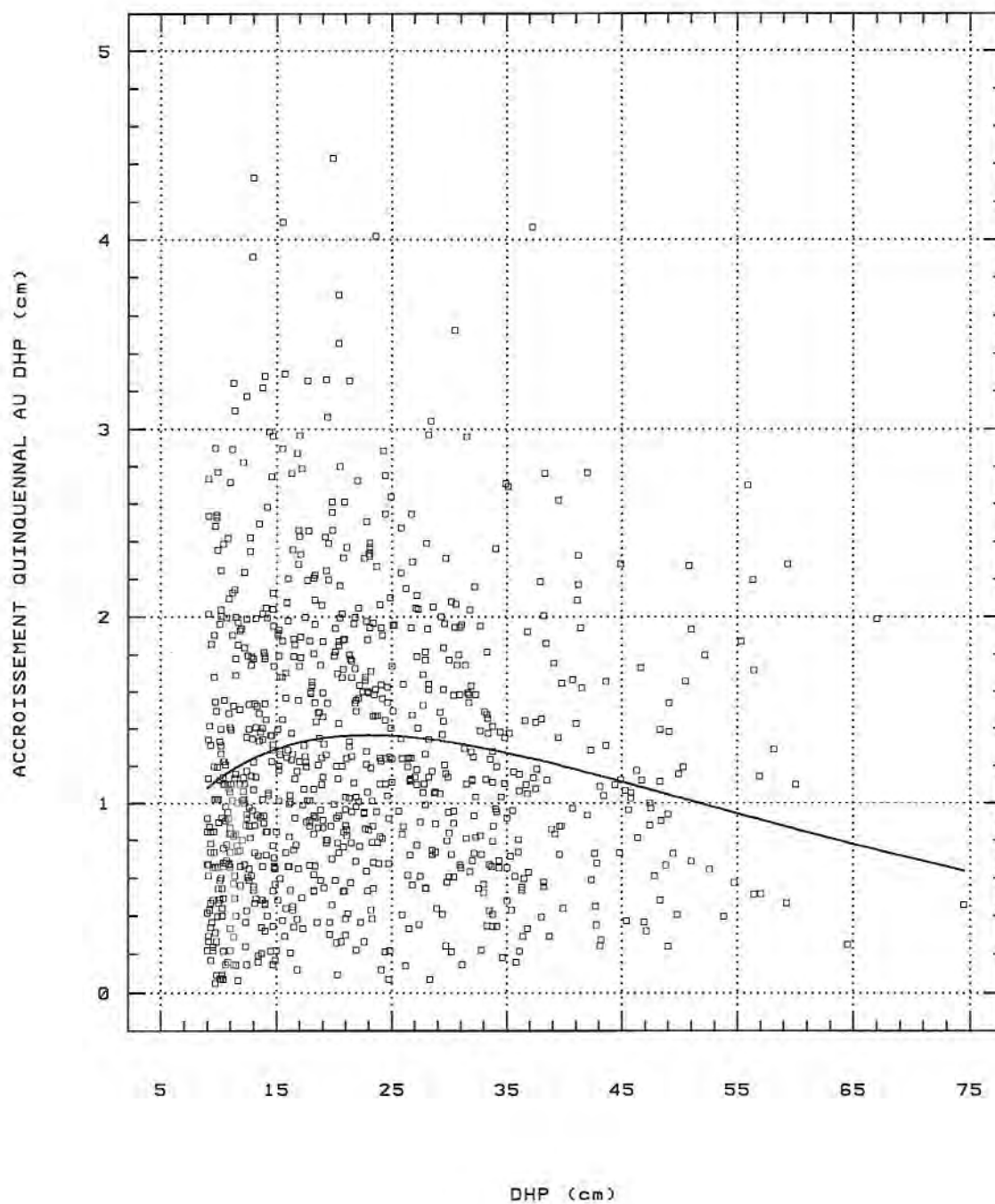


Figure 6.3. Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges de bouleau jaune.

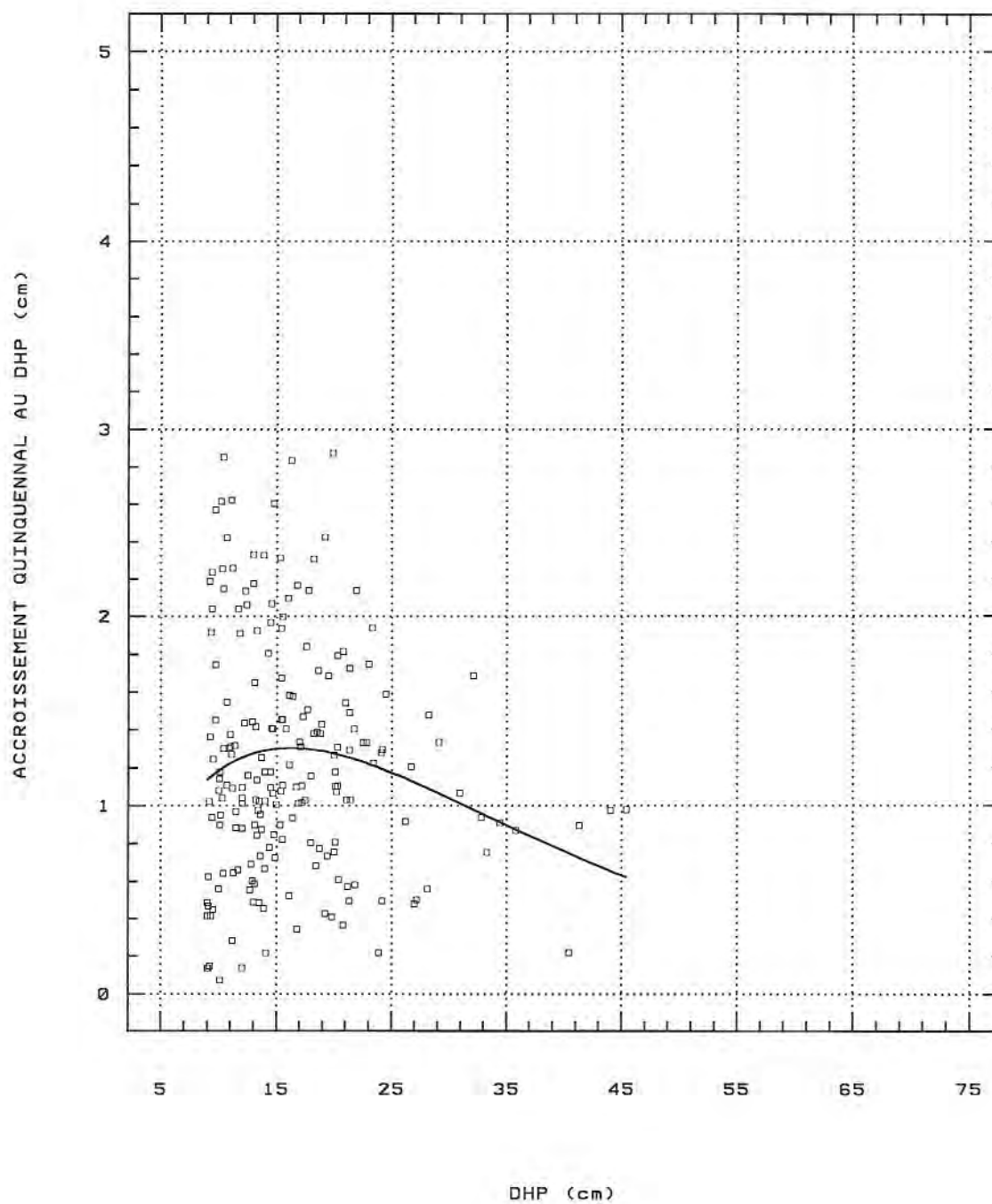


Figure 6.4. Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges de bouleau à papier.

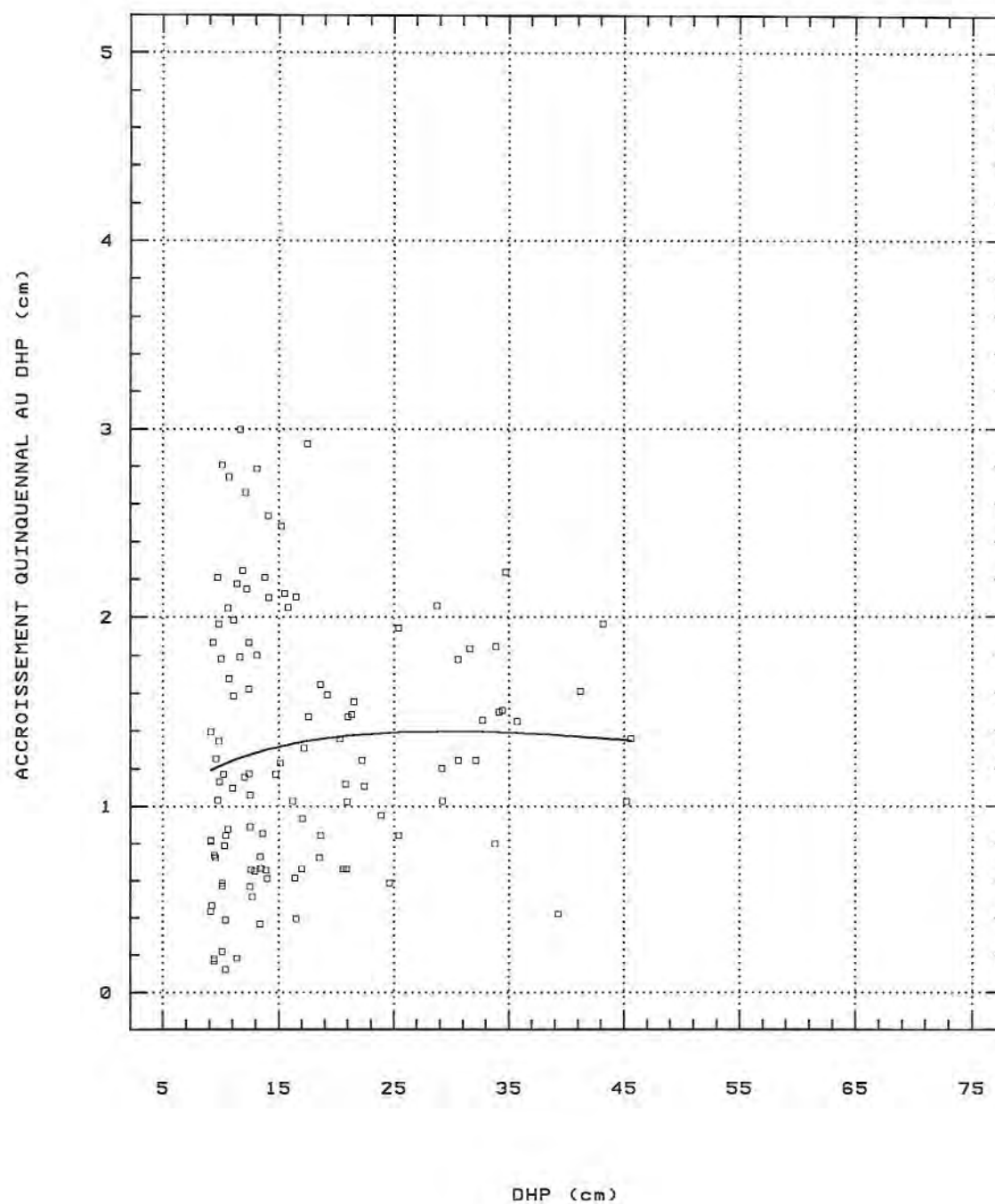


Figure 6.5. Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges d'érable à sucre.

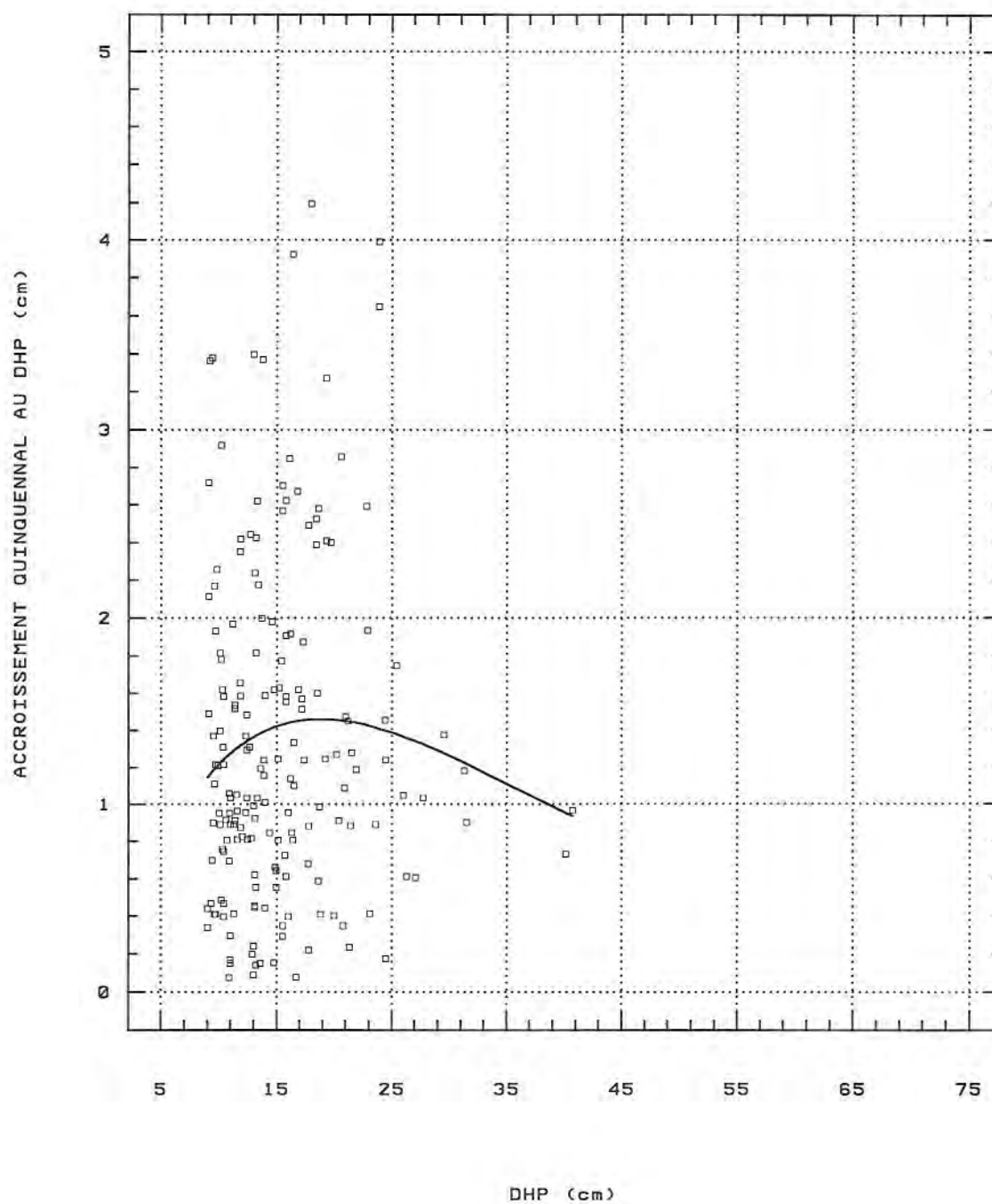


Figure 6.6. Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges d'érable rouge.

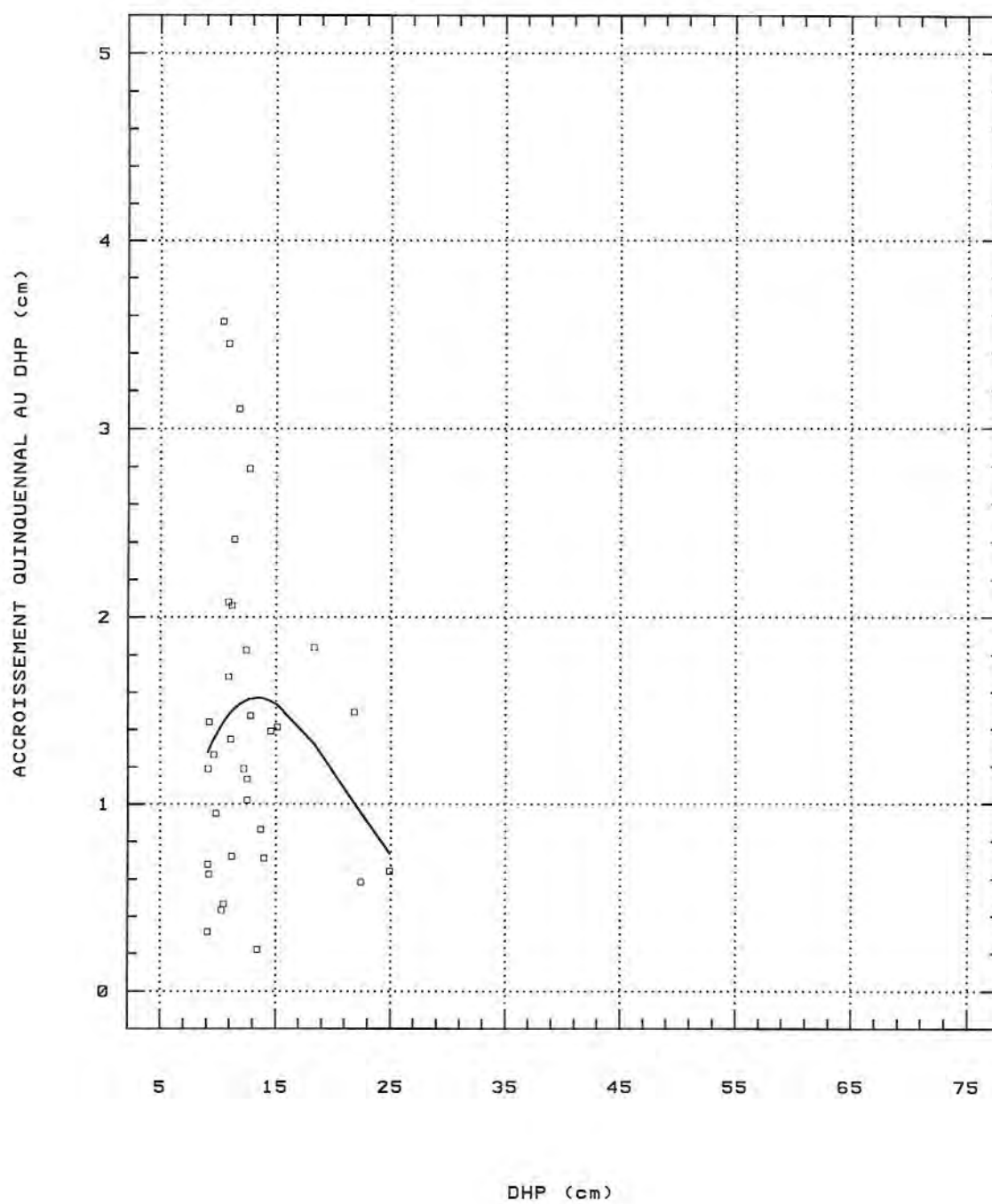


Figure 6.7. Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges de cerisier de Pennsylvanie.

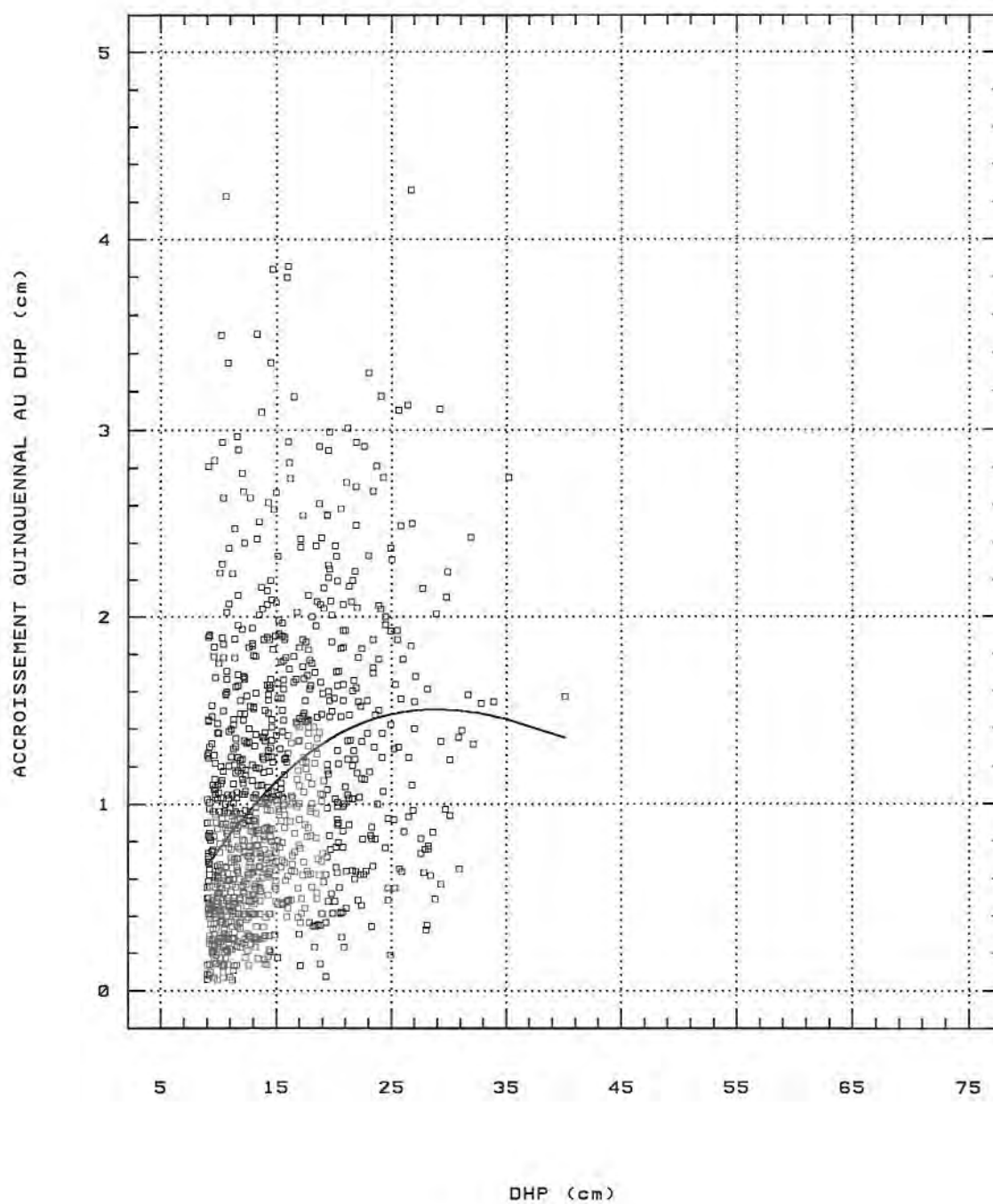


Figure 6.8. Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges de sapin baumier.

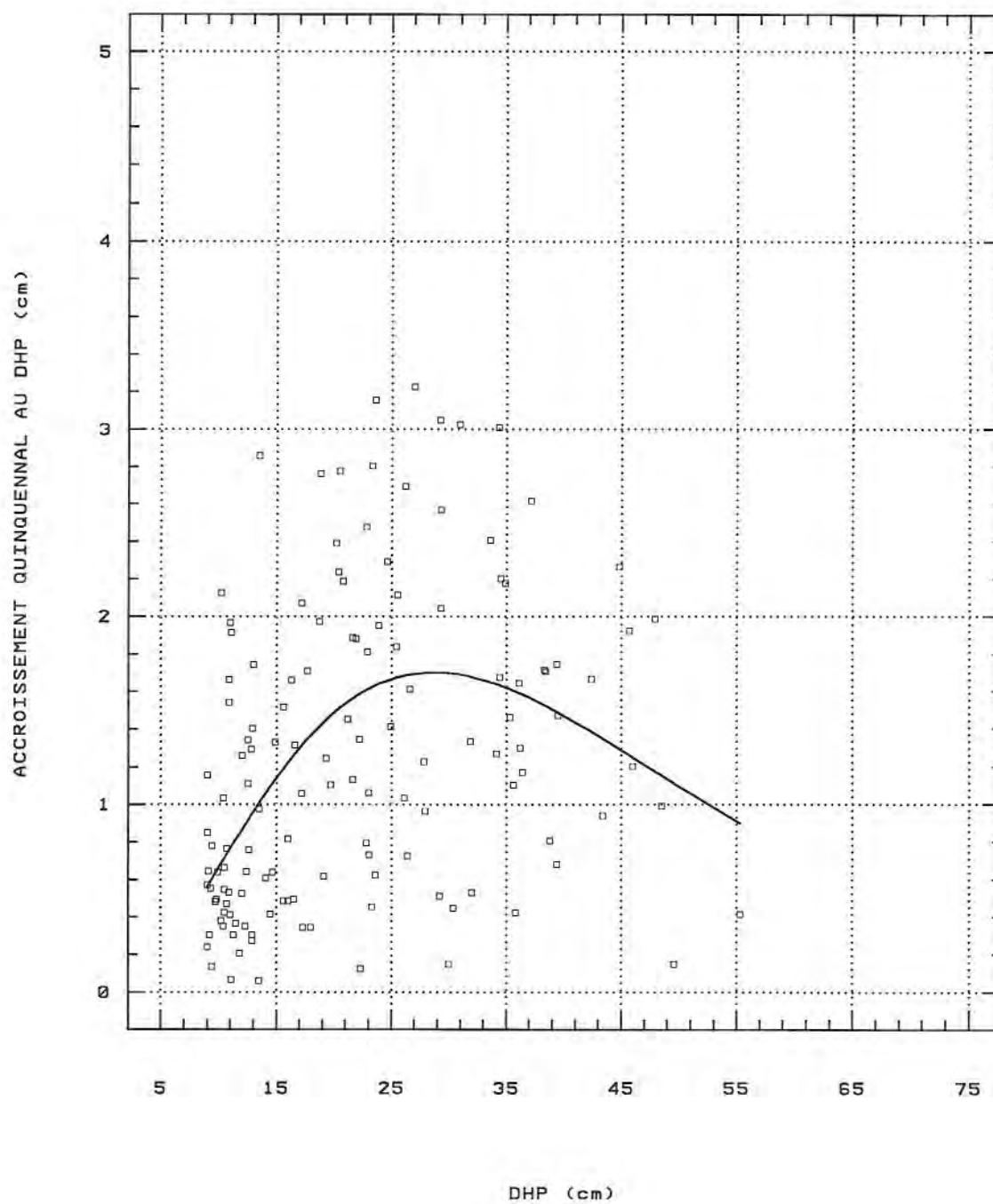


Figure 6.9. Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges d'épinette blanche.

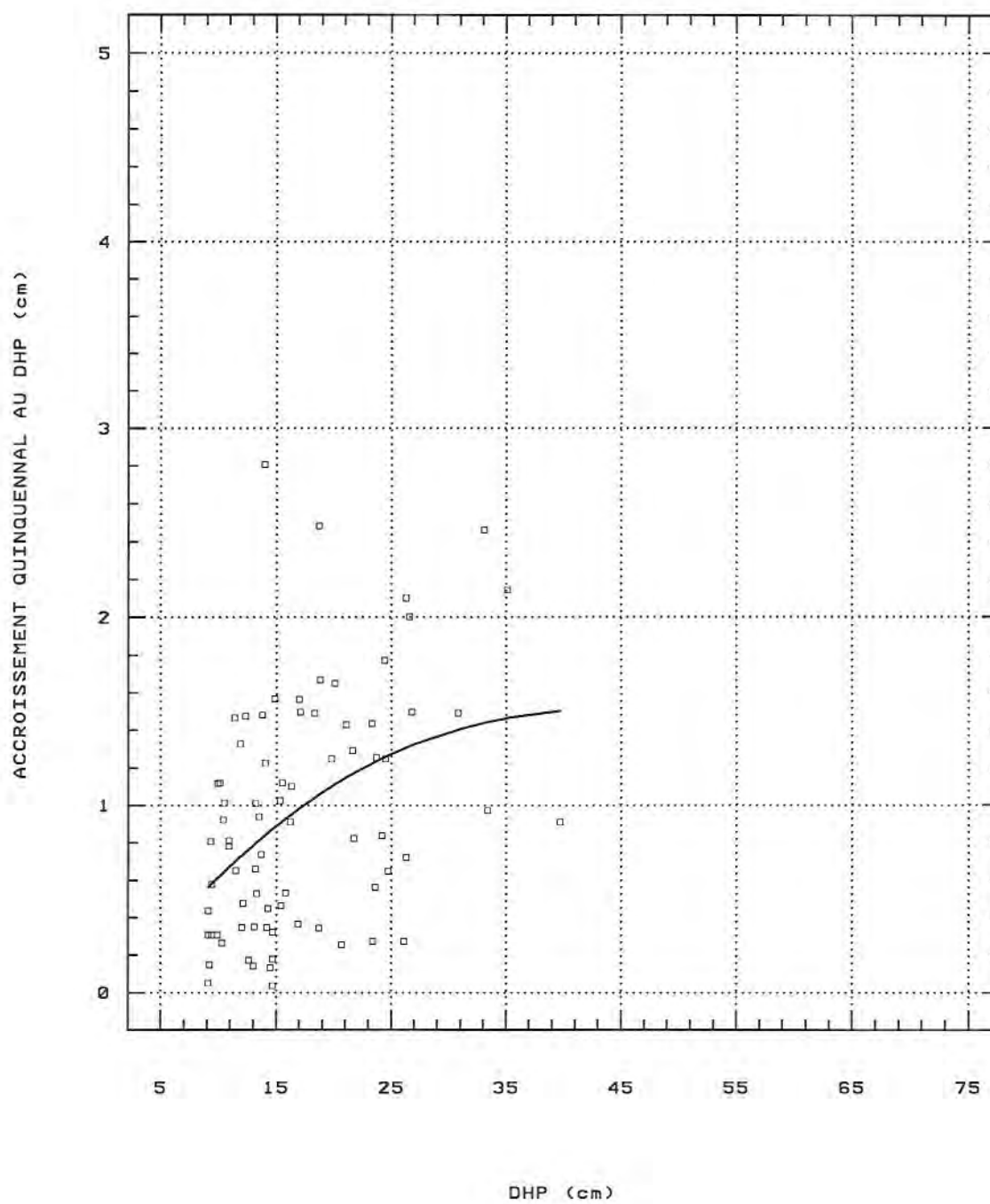


Figure 6.10. Prédiction de l'accroissement diamétral sur une base quinquennale en fonction du DHP pour chacune des tiges d'épinette rouge.