

**Dynamique dendrométrique de l'érable à sucre
dans la région du Bas-Saint-Laurent
(Comté de Témiscouata)**

Frédéric Raulier
Chhun-Huor Ung
Jean Bégin

Centre de foresterie des Laurentides
Service canadien des forêts

&

Laboratoire de Dendrométrie
Faculté de Foresterie et de Géomatique
Université Laval

Mars 1997

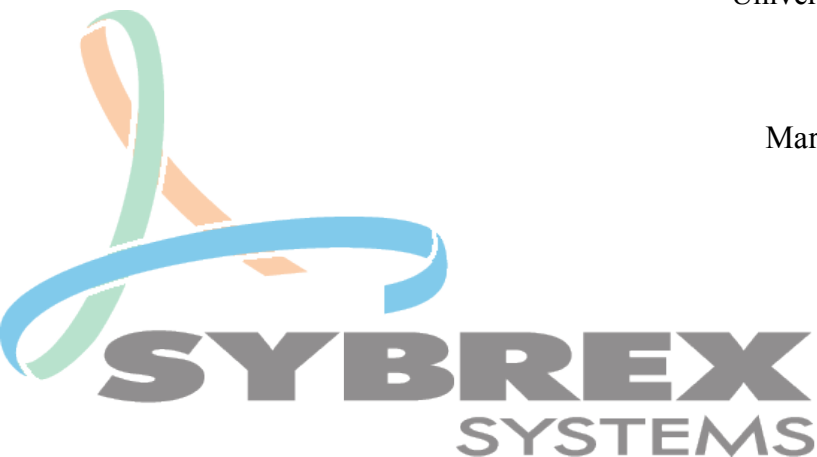


Table des matières

1	Introduction	3
2	Contexte.....	3
3	Modèle de productivité nette aérienne.....	8
3.1	Croissance en biomasse ligneuse.....	9
3.2	Estimation des variables “fonctionnelles”.....	11
3.2.1	Biomasse foliaire.....	12
3.2.2	Biomasse des branches.....	13
3.2.3	Volume d’aubier de la tige.....	14
3.3	Dynamique de croissance des paramètres morphométriques du houppier.....	15
3.3.1	Longueur du houppier.....	15
3.3.2	Rayon du houppier et longueur du houppier de lumière.....	16
3.3.3	Hauteur totale de l’arbre.....	17
4.	Validation du modèle de productivité	21
4.1.	Généralités sur le dispositif d’éclaircie	21
4.2	Caractérisation des blocs et de l’éclaircie de 1987	22
4.3	Simulations effectuées.....	26
4.4	Validations à l’échelle du peuplement.....	27
4.5.	Validations à l’échelle des distributions.....	29
4.5	Validation à l’échelle individuelle.....	32
5	Conclusions et perspectives	38
6	Bibliographie.....	39

Executive summary

The objectives of this study were to develop a growth and yield model of mixed hardwood stands dominated by sugar maple in the Lower St. Lawrence region and to produce a growth software management tool. The data used to build the growth model presented in this document comes from 15 destructive complementary plots sampled in public forests in 1994 and 1995. Partial validation has been done with four blocks of a thinning trial maintained by the CFS since 1987 and located in the study region (Squatec thinning trial).

The model considers the growth of individual trees, is distance-dependent and is partly process-based, with crown dynamics and allometry as the driving concepts. In 1995, validation with the Squatec thinning trial showed two important weaknesses in the height and volume growth submodels, which forced us to reconsider their structure.

The growth model is now entirely based on explicit functional relationships. A distinction is made between functional variables included in a process-based model explaining aboveground net productivity (ANP, leaf area and biomass, sapwood biomass) and biometrical variables used to estimate the functional ones with allometrical models (crown radius and length, total height). Process modelling of ANP requires at least a general description of the aboveground carbon cycle (photosynthetic efficiency, allocation and senescence). It is assumed with the model presented in this report that ANP is characterized at the tree level with leaf biomass, sapwood volume and canopy openness, once the environmental factors affecting growth are confounded with site index (eqs. 2 and 4).

The crown is divided into light and shade crowns. A crown profile (branch length and branching angle) is described from notions of apical control and dominance in the light crown and of physical obstruction in the shade crown. Crown surface area is estimated with the integration of the crown profile around the crown vertical axis and is related to leaf area by the crown fractal dimension (eq. 7). Leaf biomass is estimated from leaf area and a leaf area index calculated at the center of gravity of the crown volume (LAI_{cgv} - eqs. 5 and 6). Sapwood volumes of the branches and the main axis are related to the distribution of leaf area along the

crown with the pipe model theory (eqs. 9 and 13). Along the bole, a sapwood area profile model is based on sapwood area at the crown base and on mechanical considerations (eq. 13).

The ANP model is calibrated indirectly with a bole volume increment model (eq. 3). Height growth is derived directly from the ANP model (eq. 21). Crown radius increment is derived from height increment, branching angle and an obstruction index (eq. 19). Crown rise is empirically modelled from a maximum possible crown length depending on the light crown length, LAI_{cgv} and proportion of light crown (eqs. 16 and 18).

A partial validation of the growth model is made with four blocks of the Squatec thinning trial (Figs. 4 to 6). Except for a control of 400 m², a thinning in 1987 reduced the merchantable basal area of the blocks by 40, 50 and 60% (Fig. 7). An inventory done just after the thinning was used to start a simulation of tree growth in the respective blocks until 1995. Comparisons between observed and predicted values were done at the levels of the stand, the height and diameter distributions and the individual trees. Globally, no bias appears between the observed and predicted values, at any considered level (Figs. 9 to 15, Table 1). Keeping in mind that the growth model was calibrated with data originating from unmanaged stands, the proposed methodology seems potentially promising.

Three steps are still required to totally fulfill the initial objectives of the study.

- (i) Total height, crown length and radius are rarely measured in the field. Simulation exercises should be performed to show if subsampling (what, how much) can reduce this problem.
- (ii) Simulation of crown obstruction requires plot cartography. The type of thinning realized and the presence of individuals with ample crown influence the spatial distribution of trees after thinning. Unless a less time-consuming measurement method is found, it will be necessary to study the spatial distribution of trees in natural stands.
- (iii) Mortality could not have been considered since the model was calibrated with temporary plots. Permanent plots (some exist in the study region) should be used in order to model this strategical phenomenon.

1 Introduction

Le présent document présente l'essentiel des résultats d'une étude sur la croissance des érablières à bouleau jaune et à hêtre dans le comté du Témiscouata (Bas-Saint-Laurent). Il s'agissait de développer les fonctions de croissance de l'érable à sucre en mélange avec d'autres feuillus, en établissant la relation entre le potentiel stationnel, l'interception de la lumière, la surface foliaire et la croissance et en modélisant l'effet de l'éclaircie sur le houppier de l'érable à sucre.

Le document se divise en trois parties. La première partie présente de façon rapide le contexte justifiant la présente étude. La deuxième partie concerne la présentation succincte du modèle de productivité nette aérienne de l'érable à sucre. Enfin, la troisième partie s'applique à valider le modèle précédent en comparant les croissances prédites et observées des arbres situés dans quatre blocs expérimentaux du dispositif d'éclaircie de Squatec.

2 Contexte

Dans le cadre d'une thèse de doctorat en sciences forestières effectuée à l'Université Laval, le Groupement Forestier de l'Est du Lac Témiscouata et le Service canadien des forêts, Région du Québec ont initié en 1994 une étude sur la croissance des peuplements feuillus à base d'érable à sucre des territoires de l'Est-du-Lac. Les érablières représentent une proportion importante des ressources forestières du Groupement. A peu près 77% de la superficie des peuplements marchands du Groupement sont occupés par des peuplements feuillus et mélangés à dominance feuillue. Au cours des 20 dernières années, plus de 8 000 hectares de travaux sylvicoles ont été réalisés sur le territoire du Groupement mais celui-ci dispose de peu



de connaissances sur l'effet réel des traitements sylvicoles, sur l'évolution et le rendement des peuplements (Giguère, 1993 ¹).

Ce projet tente d'améliorer la connaissance de la dynamique de ces peuplements naturels mélangés et souvent irréguliers et de répondre à certaines attentes de ses gestionnaires par le biais d'un logiciel de croissance. Ce projet se réalise grâce à l'appui technique et financier de la Forêt Modèle du Bas-Saint-Laurent, du Ministère des Ressources Naturelles du Québec, du Fonds Spécial pour les Opportunités en Sciences et Technologies du Service canadien des forêts et du Service canadien des forêts, Région du Québec. Un modèle de croissance peut en effet servir à apprécier l'impact des interventions sylvicoles qui depuis 20 ans sont réalisées dans le territoire du Groupement ou mettre à jour des inventaires multi-ressources.

Le laps de temps important qui s'écoule entre la réalisation d'un traitement sylvicole et l'obtention de ses effets impose au gestionnaire de disposer d'outils de prévision. La mise au point de ces outils sous forme de modèles de croissance a constitué et constitue encore l'une des préoccupations majeures de la recherche forestière. Les modèles les plus courants (tables de production) concernent cependant des peuplements présentant une structure simple (plantation d'une seule espèce) soumis à une sylviculture schématique. La structure mélangée des essences et des âges commune aux érablières du Témiscouata n'y est pas mise à profit. La production y est considérée seulement en volume et en dimensions moyennes, sans connection possible avec sa qualité. Or, lorsque la sylviculture d'une érablière le destine vers l'obtention de bois de sciage, il devient fondamental de pouvoir prévoir la structure des arbres (empilement des cernes, branchaison) qui détermine leur valeur en quantité et en qualité.

Une solution qui est envisagée ici consiste à faire appel à un modèle considérant la croissance d'arbres individuels en fonction de leur position dans le peuplement et tient compte pour chaque arbre des interactions qu'il a avec ses voisins en compétition, projetant ainsi pendant une période déterminée sa croissance en hauteur, le développement de son houppier et la croissance en volume de sa tige en fonction de chaque situation particulière. L'approche de la modélisation par la croissance du houppier permet d'aborder de façon directe le problème de la

¹ Giguère, R., 1993. Portrait des ressources, secteur Est-du-Lac. Groupement Forestier de l'Est du Lac Témiscouata, Auclair, 18 p.

distribution du volume le long de la tige et de la qualité du bois produit, deux sujets d'intérêt pour le gestionnaire forestier.

La modélisation fonctionnelle de la croissance améliore l'aptitude des modèles dendrométriques actuels à considérer les effets de la structure irrégulière du peuplement, du mélange des espèces ainsi que ceux des éclaircies sur la croissance et la qualité du bois. Elle consiste à établir les liens fonctionnels entre des processus physiologiques expliquant la croissance et des mesures moins chères et plus faciles d'accès. Une modélisation fonctionnelle de la croissance permet d'espérer un comportement plus robuste du modèle lors de la prédiction de la croissance après intervention sylvicole. Cette démarche facilite également la validation conceptuelle du modèle, puisque ses paramètres ont un sens biologique certain.

Toutefois et de façon à donner une applicabilité certaine au modèle proposé, il est nécessaire de développer les relations permettant d'estimer les principales variables du modèle à partir de variables plus aisées à mesurer, c'est-à-dire les paramètres "morphométriques" du houppier. Il s'agit essentiellement de la hauteur totale de l'arbre, du rayon de cime et des longueurs des houppiers d'ombre et de lumière (Fig. 1).



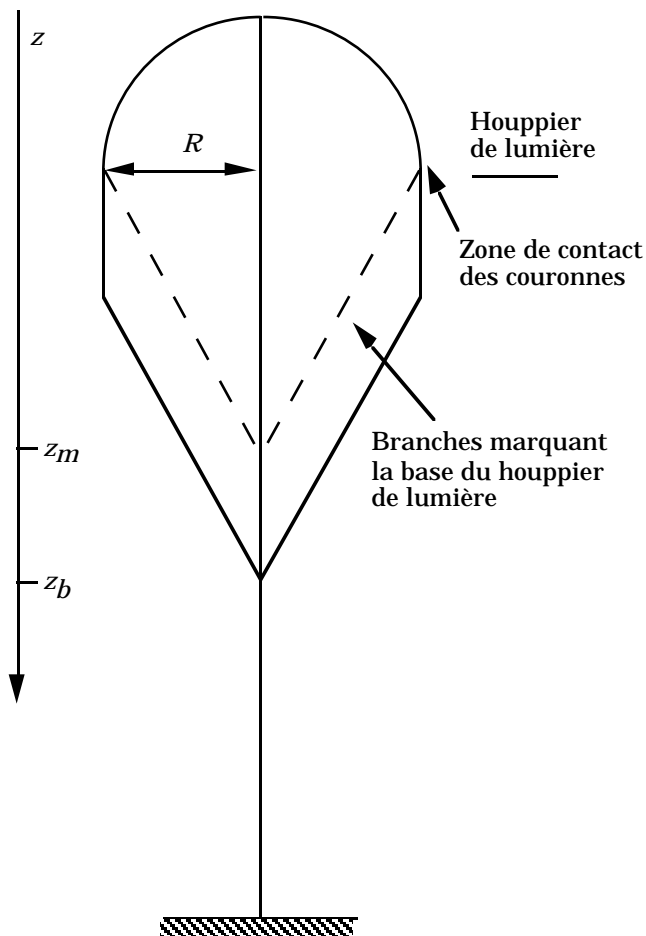


Figure 1: Paramètres morphométriques du houppier

Pour la mise au point du modèle, deux sources distinctes de données ont été utilisées. Par une entente avec le Groupement Forestier de l'Est du Lac Témiscouata, le Service canadien des forêts dispose d'un dispositif expérimental de 5 hectares dans une érablière du canton d'Auclair (Lac Squatec), qui a déjà été mesurée à plusieurs reprises entre 1987 et 1995 et qui a subi une éclaircie en 1987. Ces informations restent cependant très locales et demandent à être étendues par des données extensives réalisées sur une base régionale. Puisqu'aucune mesure destructive ne peut se faire de façon expérimentale dans les placettes permanentes du Ministère des Ressources Naturelles, il restait à installer des placettes temporaires pour étudier la branchaison de l'érable à sucre en relation

avec la compétition. Au cours des étés 94 et 95, 15 placettes ont été échantillonnées dans trois stades de développement de l'érable (gaulis, perchis et futaie) et deux types phytosociologiques (érablière à bouleau jaune et érablière à bouleau jaune et à hêtre), dans les forêts publiques du territoire, parmi un ensemble de placettes temporaires mises en place lors d'un inventaire du Ministère des Ressources Naturelles en 1986 (Fig. 2).

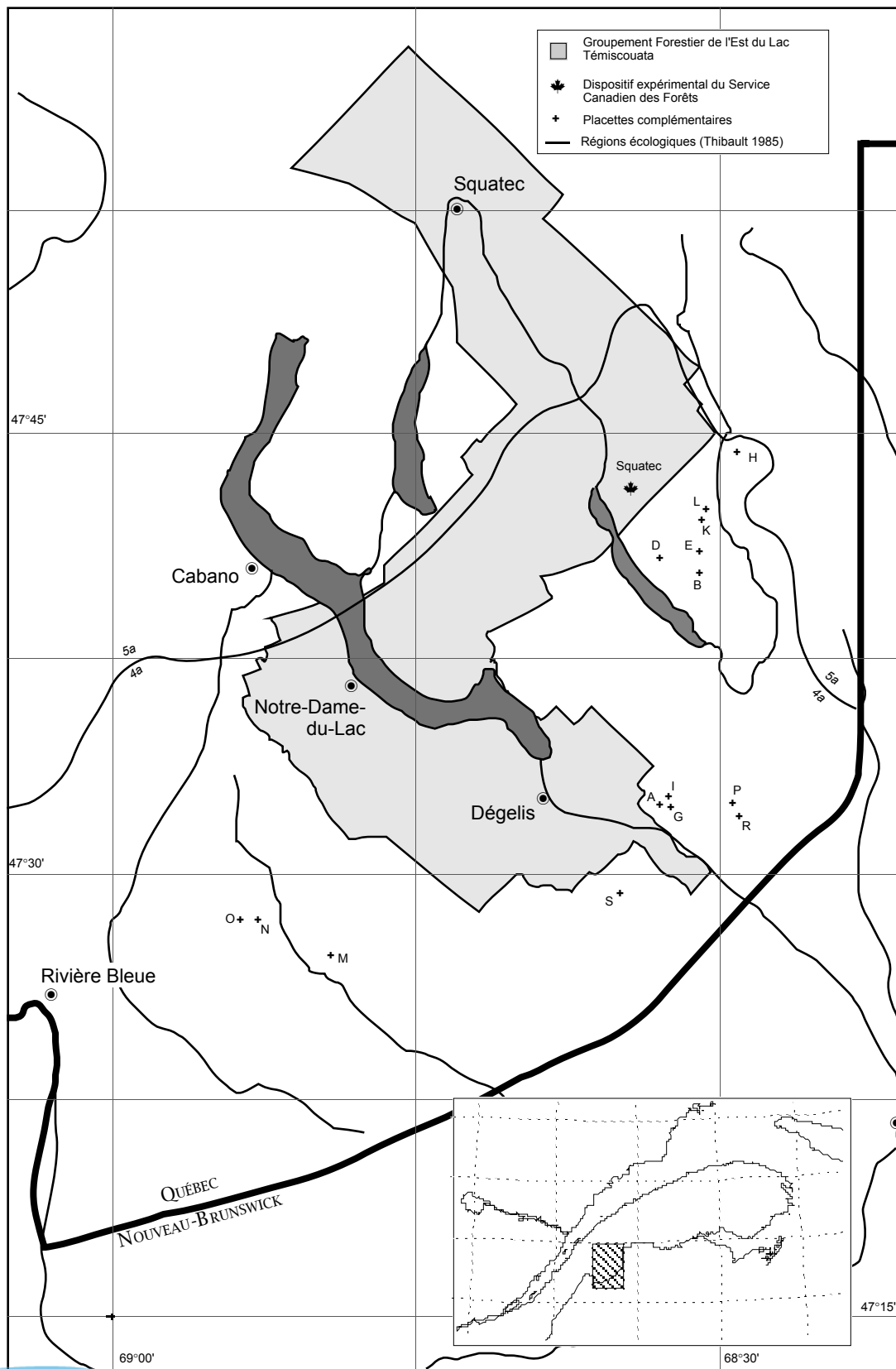


Figure 2: Localisation des sources de données utilisées pour élaborer et valider le modèle de croissance

3 Modèle de productivité nette aérienne

Le présent chapitre présente de façon succincte l'ensemble des relations constituant le modèle de croissance en question. La justification méthodologique ainsi que les méthodes de récolte des données et d'estimation des paramètres des diverses équations sont développées de façon beaucoup plus ample dans Raulier (1997²).

Une modélisation fonctionnelle de la productivité nette aérienne requiert une analyse de la productivité primaire nette et de son allocation entre plusieurs "compartiments" dont le feuillage, les branches, la tige et le système racinaire (McMurtrie et Wolf 1983, Mäkelä 1986, 1990, Nikinmaa 1992). La productivité aérienne nette d'un arbre représente l'accroissement en biomasse de ses parties aériennes et son calcul nécessite une description au moins sommaire du cycle du carbone dans l'arbre (efficacité foliaire, allocation et sénescence).

En assumant la constance au sein d'un peuplement forestier de divers facteurs environnementaux affectant la croissance (climat + éléments nutritifs + régime hydrique = fertilité stationnelle), trois variables essentiellement permettent de caractériser la productivité aérienne nette d'un arbre: la disponibilité en lumière, la biomasse foliaire et le volume d'aubier de l'arbre (e.g. McMurtrie et Wolf 1983, Mäkelä 1986, 1990, Prentice et Leemans 1990).

La hauteur totale, le rayon et les positions de la base des houppiers d'ombre et de lumière sont quatre paramètres morphométriques du houppier qui permettent d'estimer de manière satisfaisante la biomasse foliaire et le volume d'aubier des branches et de la tige. Il est donc essentiel de caractériser leur dynamique de croissance afin de pouvoir prédire à plus ou moins long terme la croissance en biomasse ligneuse d'un arbre.

Les objectifs du présent chapitre sont donc les suivants: (1) présenter un modèle de productivité nette aérienne basé sur le cycle du carbone de l'arbre, (2) présenter les modèles

² Raulier, F., 1997. Modélisation fonctionnelle de la dynamique des forêts feuillues à prédominance d'érable à sucre (Comté de Témiscouata). Thèse de Doctorat (en préparation), Faculté de Foresterie et Géomatique, Université Laval.

d'estimation de la biomasse foliaire et du volume d'aubier en fonction des paramètres morphométriques du houppier et (3) caractériser la dynamique des quatre paramètres morphologiques du houppier, c'est-à-dire de la hauteur totale, le rayon et la base des houppiers d'ombre et de lumière.

3.1 Croissance en biomasse ligneuse

La modélisation du cycle du carbone dans l'arbre considère normalement l'interaction entre deux processus antagonistes, la photosynthèse nette et la respiration (e.g. McMurtrie et Wolf 1983, Mäkelä 1986). Toutefois, la distinction entre ces deux processus ne peut se faire à l'aide des mesures normalement effectuées lors de l'élaboration d'un modèle de croissance et de rendement (fertilité stationnelle, grandeurs dendrométriques des arbres et accroissements). A l'échelle d'un modèle de croissance et de rendement, l'utilisation de ce type de mesures limite la prise en considération du cycle du carbone dans l'arbre à une analyse empirique, telle celle, par exemple, de l'efficacité foliaire (e.g. Waring et al. 1980, Causton et Venus 1981):

$$[1] \quad i_a = \epsilon_L M_L - \rho_b V_b^-$$

où i_a est la productivité aérienne nette de l'arbre (kg an^{-1}); ϵ_L est l'efficacité foliaire exprimée en terme de biomasse sèche foliaire ($\text{kg an}^{-1} \text{kg}^{-1}$); M_L est la biomasse sèche foliaire (kg); ρ_b est l'infradensité du bois (kg m^{-3}) et V_b^- est le volume de bois perdu par élagage. La productivité nette aérienne d'un arbre représente l'accroissement en biomasse de ses parties aériennes. Entre deux fins de saisons de végétation, celle-ci peut s'estimer comme étant la somme des accroissements en biomasse de trois "compartiments" tels le feuillage, la tige principale et les branches du second ordre. En assumant l'existence d'un équilibre fonctionnel entre les bilans du carbone et de l'azote (Mäkelä 1986, Wilson 1988, Thornley et Johnson 1990, Kaufman 1990), d'une proportionnalité entre le volume d'aubier aérien et sa respiration d'entretien (Pienaar et Turnbull 1973, Ryan 1990, Ryan et al. 1994, 1995) et d'une proportionnalité entre le taux respiratoire d'élaboration de la biomasse et la biomasse élaborée (McMurtrie et Wolf 1983, Mäkelä 1986), une façon de modéliser l'efficacité foliaire peut être la suivante:

$$[2] \quad \varepsilon_L = \sigma P(z_p) - 1 - \zeta \rho_b \frac{(V_s + V_b)}{M_L}$$

où σ est le coefficient d'allocation de la photosynthèse nette à la biomasse aérienne; $P(z_p)$ est le taux de photosynthèse net par unité de biomasse foliaire à une distance z_p de l'apex terminal de l'arbre (respiration foliaire incluse, $\text{kg m}^2 \text{ an}^{-1}$); ζ est le taux respiratoire de l'aubier; ρ_b est l'infradensité de la biomasse ligneuse (kg dm^{-3}); V_s et V_b sont les volumes d'aubier de la tige et des branches (dm^3). Le taux respiratoire d'élaboration de la biomasse est confondu dans le coefficient σ et le taux respiratoire ζ de l'aubier. Les méthodes d'estimation des volumes d'aubier ainsi que de la biomasse foliaire à partir des paramètres morphométriques du houppier sont développées au point 3.2. L'équation 2 peut s'interpréter comme étant le taux annuel de photosynthèse net alloué à la partie aérienne de l'arbre, diminué de la biomasse foliaire produite et de la respiration de l'aubier.

Le modèle de productivité nette aérienne a été estimé de façon indirecte, à partir de la croissance en volume de la tige. Dans le cas d'une essence à feuilles caduques, la productivité nette aérienne représente la somme des accroissements en biomasse ligneuse de la tige et des branches. A partir de la considération précédente et de l'éq. 1, on obtient:

$$[3] \quad i_{v_s} = \frac{\varepsilon_L M_L}{\rho_b} - i_{v_b}^+$$

où i_{v_s} représente l'accroissement en volume de la tige ($\text{dm}^3 \text{ an}^{-1}$) et $i_{v_b}^+$ est l'accroissement en volume des branches situées au-dessus de la position finale de la base du houppier pour la période de croissance considérée ($\text{dm}^3 \text{ an}^{-1}$). Nous reviendrons plus en détail sur $i_{v_b}^+$ au point 3.2.2. Le produit entre le coefficient d'allocation σ et le taux de photosynthèse net $P(z_p)$ a été modélisé à l'aide d'un modèle empirique dépendant de l'indice de qualité de station, de l'indice de surface foliaire des arbres voisins calculé au niveau du centre de gravité du houppier (z_p) et, après analyse des résidus, du rapport entre la longueur du houppier de lumière et la longueur totale du houppier. De plus, le taux respiratoire de l'aubier s'est révélé non significatif. La version finale du modèle de croissance en volume est la suivante:

$$[4] \quad i_{v_s} = M_L \left[\frac{P_{05}}{\rho_b} \left(\frac{P_8}{P_{05}} \right)^{\frac{0.5 - \varphi_H \eta_1 LAI_v}{0.5 - 8}} - 1 \right] - i_{v_b}^+$$

$$\text{où} \quad P_{05} = \frac{P_{s20} - P_{s12}}{20 - 12} (IQS - 12) + P_{s12}$$

où LAI_v est l'indice de surface foliaire des arbres voisins du premier ordre, calculé au niveau du centre de gravité du houppier de l'arbre considéré ($m^2 m^{-2}$); φ_H est le rapport entre la longueur du houppier de lumière et la longueur totale du houppier et IQS est l'indice de qualité de station (hauteur à 50 ans, Carmean et al. 1981). P_8 , η_1 , P_{s20} et P_{s12} sont quatre paramètres estimés statistiquement. P_{05} et P_8 représentent les taux de photosynthèse net par unité de biomasse foliaire lorsque l'indice de surface foliaire (corrigé par φ_H) est égal respectivement à 0.5 (pleine lumière) ou à 8 (totalement sous couvert). La relation exprimant le taux de photosynthèse net en fonction de l'indice de surface foliaire est une exponentielle décroissante (Hari et al. 1991), reparamétrisée de façon à améliorer le comportement statistique de ses paramètres. De plus, le paramètre P_{05} est paramétrisé en fonction de sa variabilité, apparamment linéaire, avec l'indice de qualité de station.

L'éq. 4 a été estimée de façon simultanée avec un modèle de croissance en hauteur (éq. 21). Toutefois, la présentation de celui-ci nécessite d'exposer auparavant les modèles permettant d'estimer surface et biomasse foliaire et volumes d'aubier.

3.2 Estimation des variables "fonctionnelles"

Le développement du modèle de productivité nette aérienne (point 3.1) a montré qu'il est nécessaire de pouvoir estimer la biomasse foliaire ainsi que les volumes d'aubier des branches et des tiges en vue de l'utiliser.



3.2.1 Biomasse foliaire

La biomasse foliaire est estimée à partir de la surface foliaire:

$$[5] \quad M_L = \rho_L L$$

où ρ_L est la masse surfacique foliaire moyenne (kg m^{-2}) et L est la surface foliaire totale de l'arbre (m^2). La masse surfacique foliaire moyenne a été estimée à partir de sa variabilité causée par la position du feuillage dans le couvert, notamment l'indice de surface foliaire:

$$[6] \quad \rho_L = \rho_{L.\max} - (\rho_{L.\max} - \rho_{L.\min}) e^{-e^{-\alpha_m LAI_v}}$$

où $\rho_{L.\max}$, $\rho_{L.\min}$ et α_m sont trois paramètres estimés statistiquement. Les autres termes restent tels que définis auparavant. Ellsworth et Reich (1993) ont décrit cette relation à l'aide d'une fonction de puissance, mais un modèle de Gompertz s'est révélé plus performant en termes de carré moyen résiduel. La surface foliaire de l'arbre est estimée à partir de la surface de l'enveloppe du houppier de l'arbre (Zeide et Pfeifer 1991, Raulier et Ung 1997³):

$$[7] \quad L = (\alpha - 0.5 LAI_0) \gamma^{D-2} S^{D/2}$$

où LAI_0 est l'indice de surface foliaire des arbres voisins du premier ordre, estimé au niveau de l'apex terminal de l'arbre ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) et S est la surface de l'enveloppe de son houppier (m^2). α , γ et D sont trois paramètres estimés statistiquement. La surface de l'enveloppe du houppier est elle-même estimée à partir du produit entre la longueur et le rayon du houppier (Maguire et Hann 1989, Mäkelä et Albrektson 1992, Raulier et al. 1996):

$$[8] \quad S = k_s z_b R$$

³ Raulier, F. et Ung, C.-H., 1997. Influence of shading on the relationship between leaf area and crown surface area in sugar maple stands. Soumis à Ecological Modelling. Accepté avec révision majeure.

où z_b est la longueur du houppier (m); R est le rayon moyen quadratique de la projection du houppier au sol (m) et k_g est un paramètre estimé statistiquement.

3.2.2 Biomasse des branches

A l'aide de considérations portant à la fois sur la relation entre la surface foliaire et l'aubier (Shinozaki et al. 1964), sur la fonction de distribution verticale de la surface foliaire dans l'arbre (Norman 1979) et sur une description du profil du houppier (Raulier 1997), il est possible de démontrer que le volume sans écorce des branches peut s'exprimer à l'aide de la relation suivante:

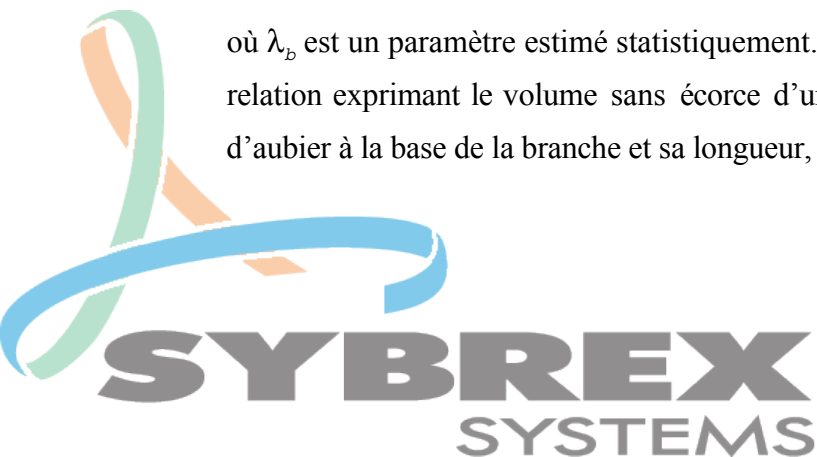
$$[9] \quad V_b = u_v f_b A_b(z_b) l_m \left(1 - \frac{\mu_2}{(\mu_2 + 2)} \varphi_H \right)$$

où u_v est un facteur de correction égal à $0.10 \text{ dm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ m}^{-1}$ de façon à exprimer le volume en dm^3 alors que $A_b(z_b)$ est mesuré en cm^2 et l_m en m; f_b est un coefficient de forme; $A_b(z_b)$ correspond à la surface cumulée d'aubier de la base d'insertion des branches du second ordre; l_m est la longueur maximale d'une branche dans le houppier; φ_H est un coefficient de forme du houppier, égal au rapport entre z_m et z_b . μ_2 est un paramètre dérivé du modèle du profil du houppier (Raulier 1997). L'équation 9 appartient à la famille des équations de cubage se référant au volume d'un cylindre.

La surface cumulée d'aubier de la base d'insertion des branches du second ordre est estimée à partir de la surface foliaire (Shinozaki et al. 1964):

$$[10] \quad A_b(z_b) = \frac{L}{\lambda_b}$$

où λ_b est un paramètre estimé statistiquement. Le facteur de forme f_b est estimé à partir de la relation exprimant le volume sans écorce d'une branche, v_b (dm^3), en fonction de la surface d'aubier à la base de la branche et sa longueur, c'est-à-dire:



$$[11] \quad v_b = u_v f_b a_b l_b$$

où a_b est la surface d'aubier à la base de la branche (cm^2) et l_b est sa longueur (m). La longueur maximale des branches du houppier, la longueur d'une branche quelconque ainsi que la surface d'aubier à la base de cette branche sont dérivées du modèle du profil du houppier (Raulier 1997).

A partir de la dérivée par rapport au temps des éqs. 7, 8, 9 et 10, il est possible de démontrer que l'accroissement en volume des branches situées au-dessus de la position finale de la base du houppier pour la période de croissance considérée est égal à:

$$[12] \quad i_b^+ = \rho_b v_b \left(\frac{D+2}{2R} \mu_2 o_R + \frac{D}{2z_b} \right) i_H$$

où i_H est l'accroissement en hauteur (m an^{-1}); le terme o_R est expliqué au point 3.3.2.

3.2.3 Volume d'aubier de la tige

De la même façon que pour le volume sans écorce des branches, en associant des considérations portant sur la relation entre surface foliaire et aubier (Shinozaki et al. 1964), sur la fonction de distribution verticale de la surface foliaire dans l'arbre (Norman 1979), sur une description du profil du houppier (Raulier 1997), sur des considérations de résistance de la tige au vent sous le houppier (Morgan et Cannell 1994) ainsi que sur une relation entre la surface d'aubier et la surface de la section, il est possible de démontrer que le volume d'aubier de la tige peut s'exprimer comme:

$$[13] \quad v_s = u_v A_s(z_b) \left[\frac{1}{3} z_b (2 - \varphi_H) + \frac{g_s^{\gamma_5+1} - g_b^{\gamma_5+1}}{(\gamma_5 + 1) g_b^{\gamma_5}} + \left(\frac{g_s}{g_b} \right)^{\gamma_5} \frac{g_H^{\gamma_6+1} - g_s^{\gamma_6+1}}{(\gamma_6 + 1) g_s^{\gamma_6}} \right]$$

où $A_s(z_b)$ est la surface d'aubier de la tige à la base du houppier (z_b); g_b , g_s et g_H sont des distances séparant respectivement la base du houppier, le début de la zone des empattements

de la souche ainsi que le pied de l'arbre au centre de gravité du volume du houppier (m). γ_5 et γ_6 sont deux paramètres dérivés d'un modèle du profil de l'aubier dans la tige (Raulier 1997). Le début de la zone des empattements de la souche est assumée proportionnelle à la hauteur totale de l'arbre (Max et Burkhart 1976, Demaerschalk et Kozak 1977). La position du centre de gravité du volume du houppier est estimée numériquement à partir du modèle de profil du houppier (Raulier 1997). La surface d'aubier de la tige à la base du houppier est estimée d'une façon analogue à celle utilisée pour dériver l'éq. 10:

$$[14] \quad A_s(z_b) = \frac{L}{\lambda_s}$$

où λ_s est un paramètre estimé statistiquement.

3.3 Dynamique de croissance des paramètres morphométriques du houppier

Trois paramètres morphométriques du houppier en sus de la hauteur totale permettent d'estimer la biomasse foliaire (éq. 5) et les volumes d'aubier des branches (éq. 9) et de la tige (éq. 13). Il s'agit du rayon et de la longueur du houppier ainsi que de la distance à l'insertion des branches marquant la base du houppier de lumière. Les paragraphes suivants vont montrer que la dynamique de croissance de ces trois variables morphométriques se caractérise essentiellement par celle de la hauteur totale.

3.3.1 Longueur du houppier

La base du houppier au temps t peut être égale à:

$$[15] \quad z_b(t) = \min(z_b(t-1), z_{b. \max})$$

et à l'échelle annuelle, la dérivée de z_b par rapport au temps, i_{z_b} , sera égale à:

$$[16] \quad i_{z_b} = i_H - e$$

où

$$[17] \quad e = \begin{cases} 0 & \text{si } z_b < z_{b.\max} \\ z_{b.\max} - z_b(t - 1) & \text{sinon} \end{cases}$$

La longueur maximale du houppier est modélisée empiriquement, en partant du principe que lorsque l'arbre croît à découvert, la longueur de son houppier est égale à celle du houppier de lumière. Via une analyse des résidus, il est apparu que cette longueur maximale dépendait également du rapport entre la longueur du houppier de lumière et la hauteur totale et de la position sociale de l'arbre dans le couvert:

$$[18] \quad z_{b.\max} = z_m e^{\frac{\gamma_9}{0.4} \left(0.6 - \frac{z_m}{H}\right)} e^{\gamma_{10} + \gamma_{11} LAI_v}$$

où z_m est la longueur du houppier de lumière (m); H est la hauteur totale de l'arbre (m). γ_9 à γ_{11} sont trois paramètres estimés statistiquement. Les autres termes restent tels que définis auparavant.

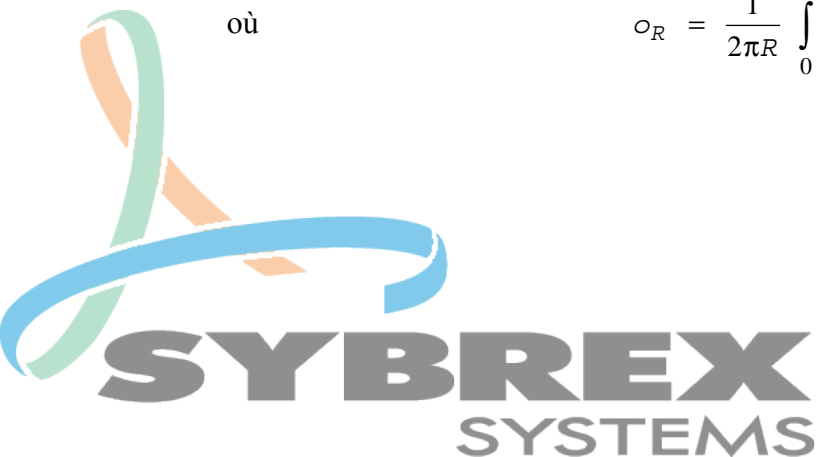
3.3.2 Rayon du houppier et longueur du houppier de lumière

A partir de la définition du rayon moyen quadratique du houppier (Rondeux 1993), de considérations sur la gêne des couronnes (Mitchell 1969, 1975, Inose 1982) et sur l'angle de branchaison, l'extension horizontale annuelle du houppier peut se modéliser comme:

$$[19] \quad i_R = \mu_2 i_H o_R$$

où

$$o_R = \frac{1}{2\pi R} \int_0^{2\pi} \frac{R^2(\theta)}{z_m(\theta)} o_R(\theta) d\theta$$



où i_R est l'accroissement moyen en rayon du houppier (m an^{-1}); o_R est un indice d'obstruction; $R(\theta)$ et $z_m(\theta)$ sont le rayon du houppier et la longueur du houppier de lumière selon la direction θ ; $o_R(\theta)$ est un indice d'obstruction dans la même direction, défini par:

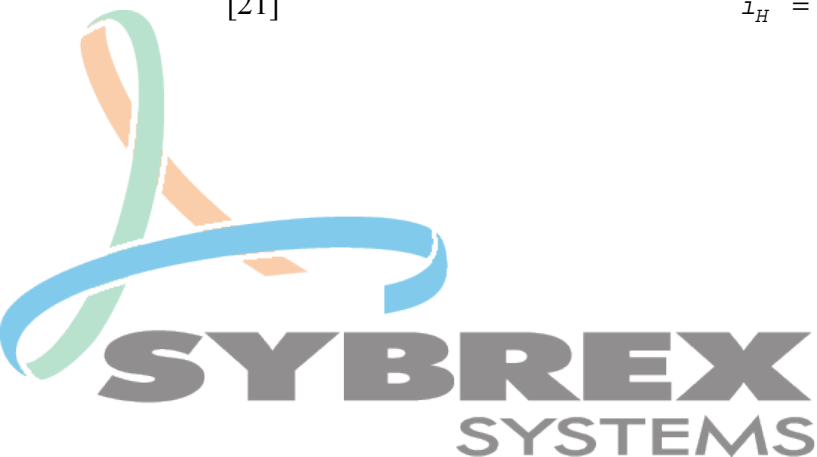
$$[20] \quad o_R(\theta) = \begin{cases} 0 & \text{si obstruction} \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

Il est possible de déduire z_m , la position du houppier de lumière, à partir du modèle du profil du houppier (Raulier 1997) et de la connaissance du rayon moyen du houppier.

3.3.3 Hauteur totale de l'arbre

Outre les facteurs externes causés par l'obstruction physique et l'ambiance lumineuse du houppier, l'accroissement en hauteur "contrôle" dans le présent modèle les accroissements de toutes les variables déterminant la surface foliaire et les volumes d'aubier des branches et de la tige (Fig. 3). Il est donc essentiel que la valeur déterminée pour l'accroissement en hauteur conserve l'intégrité de toutes les relations structurales du modèle de croissance dont la dynamique de croissance en dépend. Le modèle d'accroissement en hauteur est donc dérivé du modèle de productivité nette aérienne. Dans le cas d'une essence caducifoliée comme l'érable à sucre, la productivité nette aérienne représente la somme des accroissements en biomasse de la tige et des branches. Ces deux derniers accroissements peuvent être trouvés en dérivant par rapport au temps les relations expliquant les volumes ligneux des branches et de la tige en fonction des paramètres morphométriques du houppier. Les accroissements de ces paramètres, nous l'avons vu aux deux paragraphes précédents, dépendent essentiellement de l'accroissement en hauteur. D'une telle façon, un modèle d'accroissement en hauteur peut être le suivant:

$$[21] \quad i_H = \frac{\varepsilon_L M_L}{\rho_b A_H}$$



$$\text{où } A_H = \frac{D}{2} (V_b + \gamma_4 V_F + \eta_2 V_H(z_b)) \left(\frac{\mu_2 \circ_R}{R} + \frac{1}{z_b} \right) ;$$

$$+ \frac{\mu_2 \circ_R}{R} V_b + \eta_2 \frac{V_H(z_b)}{z_b} + \frac{\Phi_F}{H_F + H_S} V_F$$

$$\Phi_F = (1 - i_s - \gamma_7) \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{g_s} H_S - (1 - \gamma_7) \left(1 - \frac{\gamma_1}{g_b} (H_F + H_S) - \left(\frac{g_s}{g_b} \right)^{\gamma_1} \left(\frac{g_H}{g_s} \right)^{\gamma_2} \right) ;$$

$$H_F = \frac{g_s^{\gamma_1+1} - g_b^{\gamma_1+1}}{(\gamma_1 + 1) g_b^{\gamma_1}}$$

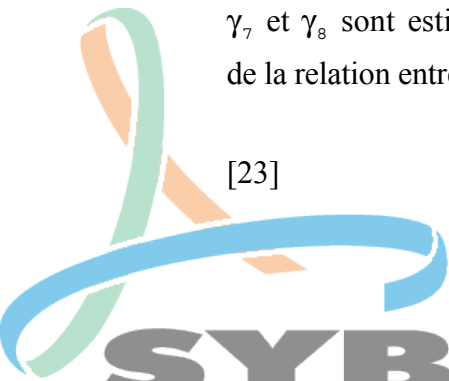
$$\text{et } H_S = \left(\frac{g_s}{g_b} \right)^{\gamma_1} \frac{g_H^{\gamma_2+1} - g_s^{\gamma_2+1}}{(\gamma_2 + 1) g_s^{\gamma_2}}$$

où V_F est le volume sans écorce de la tige sous le houppier (dm^3); $V_s(z_b)$ est le volume d'aubier de la tige dans le houppier (dm^3); γ_1 , γ_2 et γ_4 sont trois paramètres dérivés d'un modèle du profil de l'aubier dans la tige (voir le développement de l'éq. 12, Raulier 1997); i_s est un coefficient de proportionnalité entre le début de la zone des empattements de la souche et la hauteur totale, estimé statistiquement (voir les explications de l'éq. 12); γ_7 est un paramètre dérivé d'une relation empirique entre la longueur du houppier et la position du centre de gravité du volume du houppier relativement à l'apex terminal de l'arbre, z_v (m):

$$[22] \quad z_v = \gamma_7 z_b + \gamma_8$$

γ_7 et γ_8 sont estimés statistiquement. η_2 est un paramètre estimé statistiquement, provenant de la relation entre le volume d'aubier et le volume sans écorce de la tige dans le houppier:

$$[23] \quad v(z_b) = V_s(z_b)^{\eta_2}$$



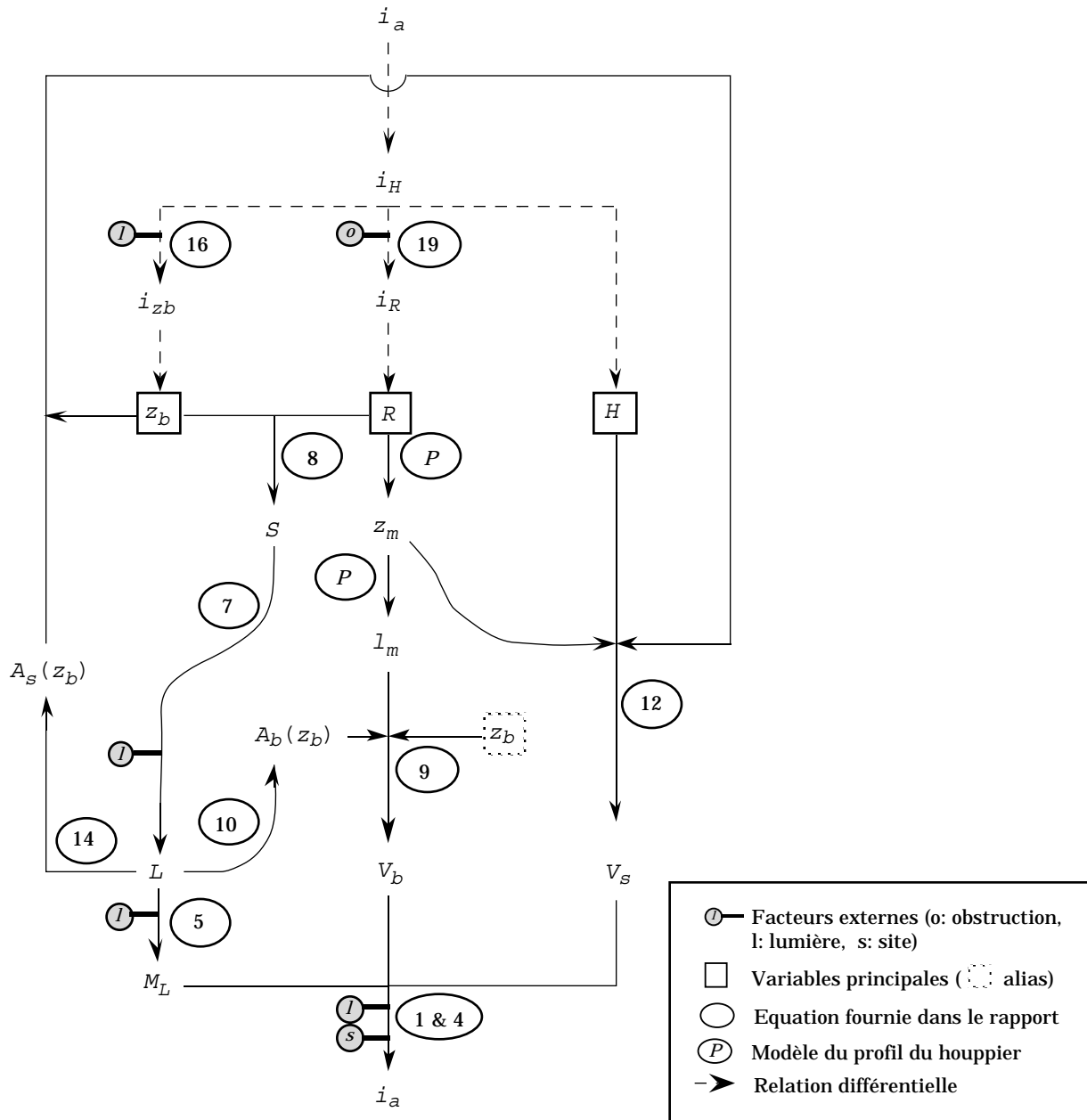


Figure 3: Mise en évidence de l'importance de la croissance en hauteur dans la dynamique de croissance des variables morphométriques du houppier nécessaires afin de déterminer la productivité nette aérienne. i_a est la productivité aérienne nette, i_{zb} est l'accroissement de la distance à la base du houppier, i_R est l'accroissement en rayon du houppier, z_m est la distance à la base d'insertion des branches marquant la base du houppier de lumière, S est la surface du houppier, z_s est la distance au début des empattements, $A_s(z_b)$ est la surface transversale d'aubier à la base du houppier, $A_b(z_b)$ est la somme des surfaces transversales d'aubier des branches situées au-dessus de la base du houppier, L est la surface foliaire, V_s et V_b sont les volumes d'aubier de la tige et des branches.

où $V(z_b)$ est le volume sans écorce de la tige dans le houppier (dm^3). Le volume d'aubier de la tige dans le houppier correspond à la première partie de l'éq. 12:

$$[24] \quad V_s(z_b) = \frac{1}{3} u_v A_s(z_b) z_b (2 - \phi_H)$$

où les termes sont ceux définis à l'éq. 12. Le volume sans écorce de la tige sous le houppier est, quant à lui, dérivé d'un modèle du profil de la tige (voir le développement de l'éq. 12):

$$[25] \quad V_F = u_v A(z_b) \left[\frac{g_s^{\gamma_1+1} - g_b^{\gamma_1+1}}{(\gamma_1 + 1) g_b^{\gamma_1}} + \left(\frac{g_s}{g_b} \right)^{\gamma_1} \frac{g_H^{\gamma_2+1} - g_s^{\gamma_2+1}}{(\gamma_2 + 1) g_s^{\gamma_2}} \right]$$

où $A(z_b)$ est la surface sans écorce de la tige à la base du houppier (cm^2), exprimée à partir d'une relation empirique existant entre la surface sans écorce de la tige et sa surface d'aubier:

$$[26] \quad A(z_b) = \gamma_3 A_s(z_b)^{\gamma_4}$$

γ_3 et γ_4 sont estimés statistiquement. La surface d'aubier de la tige à la base du houppier est estimée à partir de la surface foliaire (voir éq. 14).

4. Validation du modèle de productivité

Une des étapes de validation d'un modèle de croissance consiste à utiliser un ensemble de données récoltées dans la même région d'étude mais qui n'ont pas servi à l'élaboration du modèle. Le chapitre fait état des validations effectuées avec le modèle de croissance présenté au point précédent avec les données de quatre blocs de mesurage du dispositif d'éclaircie de Squatec.

4.1. Généralités sur le dispositif d'éclaircie

L'ensemble du dispositif (Figs 2 et 4, 47°43'N 68°34'O, 350 m d'altitude) couvre une superficie de 5.85 ha et se constitue d'une jeune futaie régulière d'érable à sucre appartenant au domaine climacique de l'érablière à bouleau jaune (Grandtner 1966). Le massif auquel il appartient couvre la moitié supérieure du versant d'une colline arrondie, sur une pente douce et exposée vers le sud-ouest. Il provient très probablement d'une coupe totale effectuée fin des années 30, début des années 40 (Trencia 1985⁴). Cette jeune futaie est essentiellement composée d'érable à sucre de petite dimension accompagné de quelques hêtres à grandes feuilles et de bouleaux jaunes de fort diamètre, sans doute rémanents du peuplement précédent. Quelques érables rouges ainsi que du peuplier tremble se retrouvent également parsemés dans le peuplement (Figs. 5 à 7). Parmi les données exploitables pour la présente validation, il faut retenir les suivantes :

- 1984 : Mise sur pied du dispositif.
- 1987 : Cartographie de deux blocs de 50x50 m, le bloc "Fort" et le "Faible"
Mesure des dhp et hauteurs totales de tous les arbres
Eclaircie dans tout le peuplement.

⁴ Trencia, J., 1985, Description des travaux de recherche réalisés entre 1982 et 1984 dans la forêt expérimentale du JAL. Rapport interne, Service canadien des forêts, Région du Québec, Ste-Foy, 11 p. + figures et annexes.

- 1988 : Mesure de la projection des cimes sur 8 points dans les deux blocs
- 1989 : Cartographie d'un bloc de 50x50 m, le bloc "Moyen" et d'un bloc de 20x20 m, le bloc "Témoin".
- 1989, 1991 et 1995 : Mesure des dhp, hauteurs totales, hauteurs de la base du houppier de lumière (1989) et projection des cimes sur 8 points dans les 4 blocs. La projection des cimes a été effectuée seulement pour les arbres ayant plus de 10 cm de diamètre à 1.30 m.

Toutes les mesures ont été effectuées en fin de saison de croissance. Ce dispositif a déjà fait l'objet d'une publication (Ung et Trencia 1989).

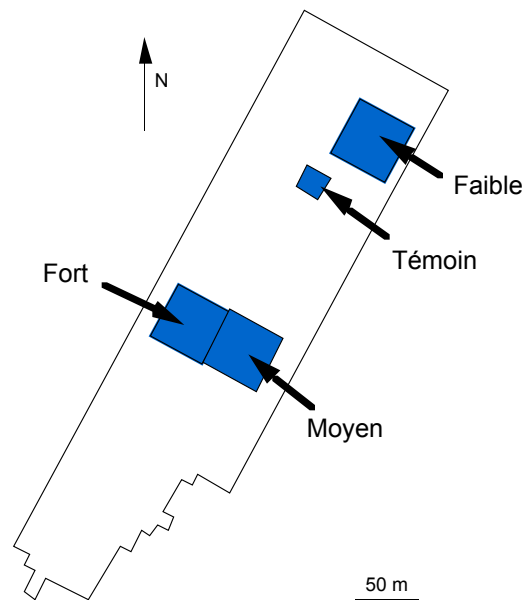


Figure 4: Dispositif d'éclaircie de Squatec.

4.2 Caractérisation des blocs et de l'éclaircie de 1987

A l'exception du bloc Témoin, l'éclaircie pratiquée en 1987 dans tout le dispositif a éliminé l'étage dominé du peuplement ainsi que la majorité des rémanents du peuplement antérieur. Le prélèvement s'est élevé à approximativement 40% de la surface terrière marchande dans le bloc Faible, 50% dans le bloc Moyen et 60% dans le bloc Fort. Il s'agit d'une éclaircie très forte par le bas (Fig. 7). Le pourcentage le plus faible de surface terrière

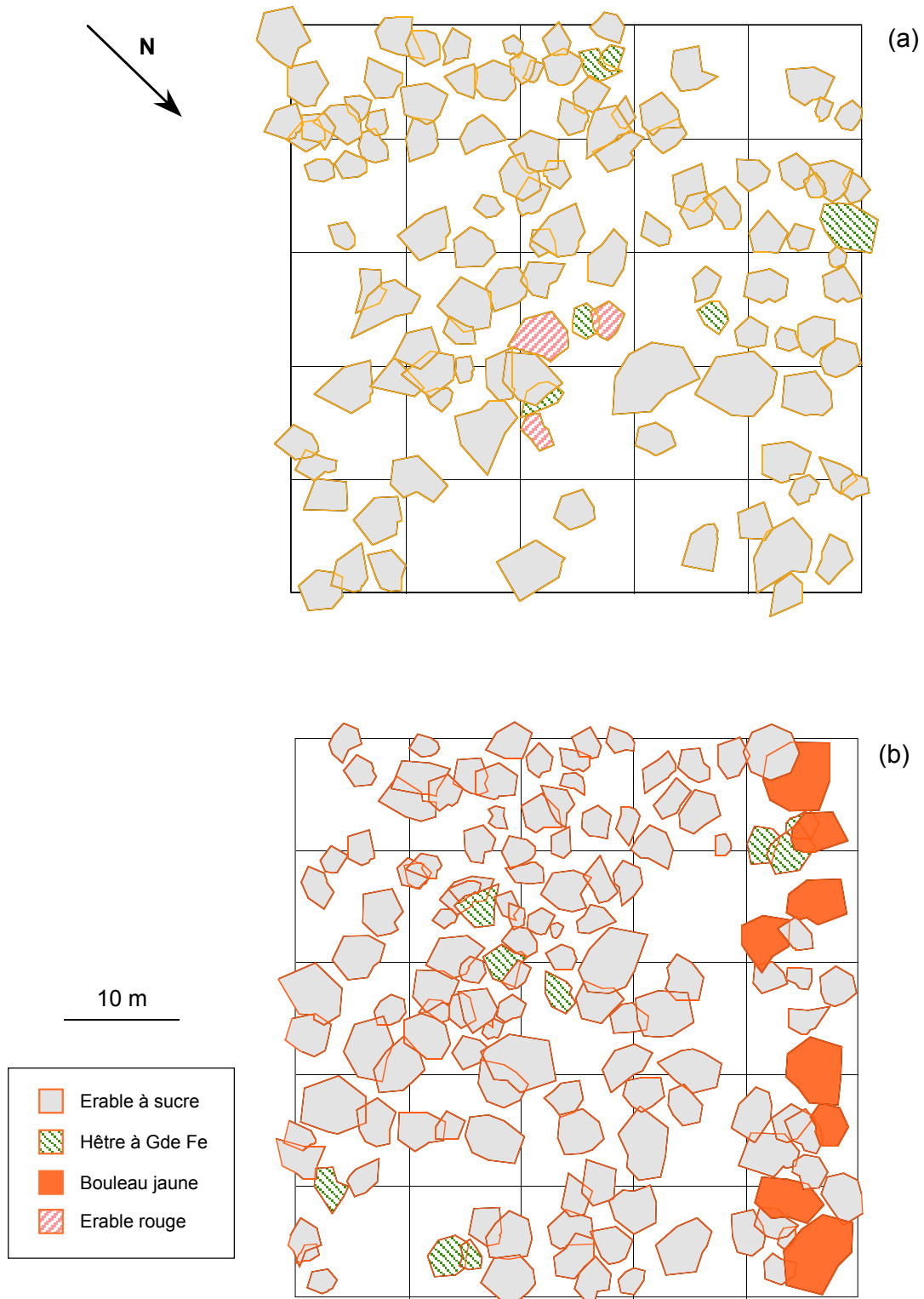


Figure 5: Projection des cimes des arbres des blocs Fort (a) et Moyen (b) en 1989.

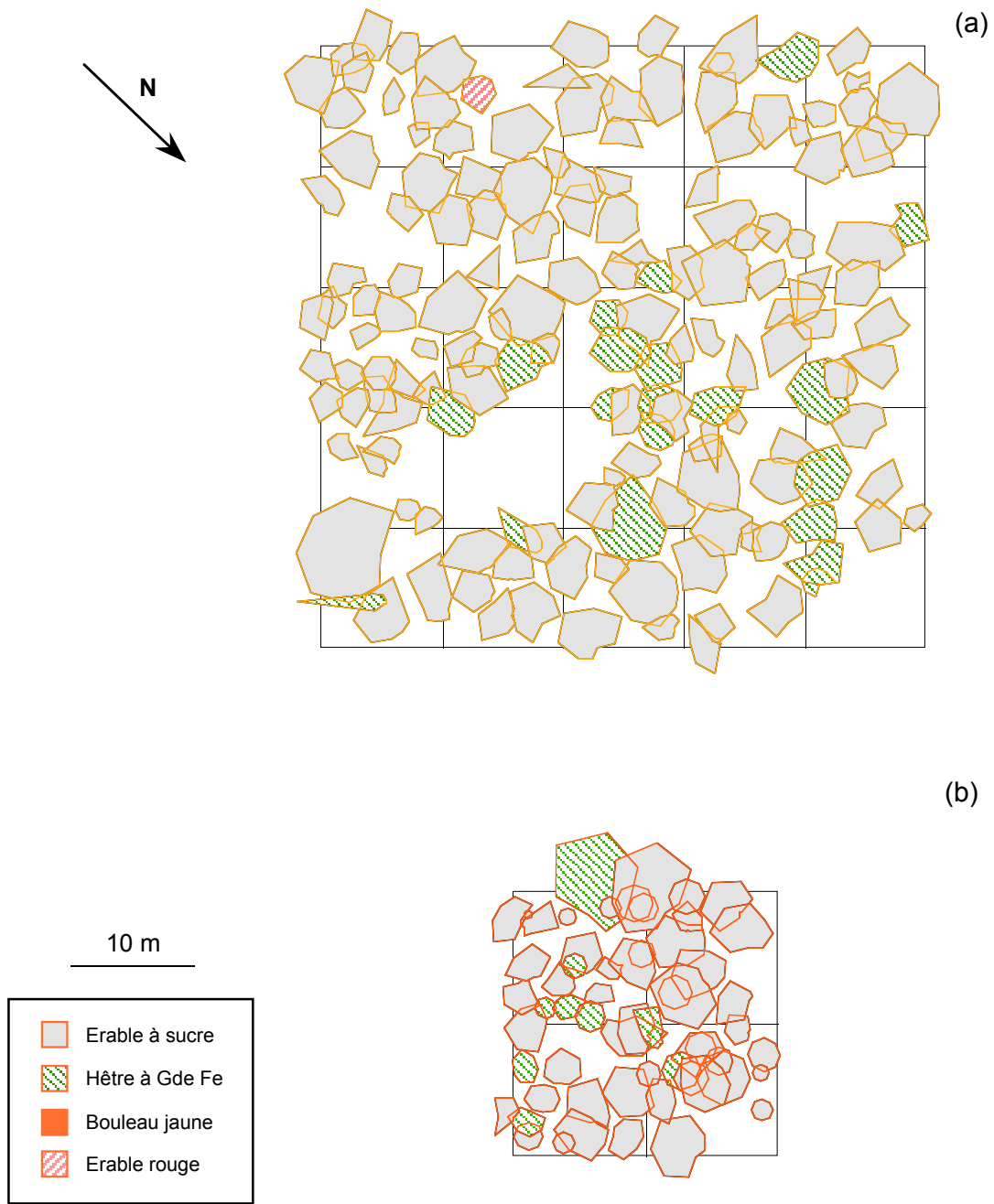


Figure 6: Projection des cimes des arbres des blocs Faible (a) et Témoin (b) en 1989.

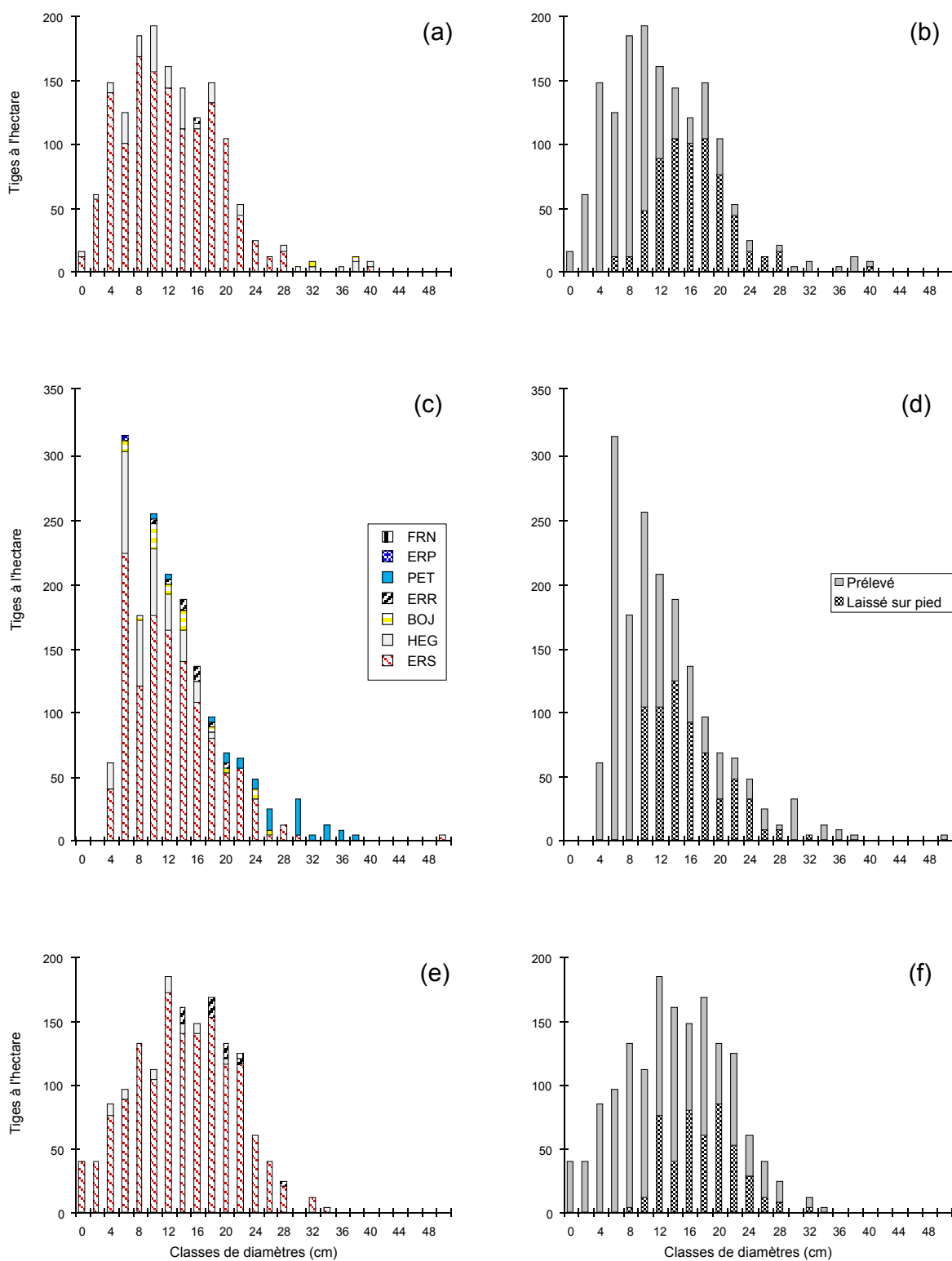


Figure 7: Distributions des diamètres dans les blocs Forts (a-b), Moyen (c-d) et Faible (e-f) au moment de l'éclaircie pratiquée en 1987. Les graphiques de la colonne de gauche indiquent la distributions des espèces dans les trois blocs et ceux de la colonne de droite caractérisent l'éclaircie effectuée. FRN: frêne noir, ERP: érable de Pennsylvanie, PET: peuplier faux-tremble, ERR: érable rouge, BOJ: bouleau jaune, HEG: hêtre à grandes feuilles, ERS: érable à sucre.

enlevée dans les blocs du dispositif (40%) correspond très exactement à la limite supérieure des normes de l'éclaircie commerciale admise par le Ministère des Ressources Naturelles dans les peuplements de feuillus tolérants (Ministère des Ressources Naturelles 1992).

La présence de forts individus a gêné le déroulement normal de l'éclaircie. Leur élimination a causé des vides importants et donne une impression d'hétérogénéité à la distribution spatiale des arbres.

4.3 Simulations effectuées

Toutes les simulations ont été effectuées sur DendroSim (Raulier 1995⁵). DendroSim est un logiciel de simulation où la forme du modèle de croissance ainsi que les équations font partie intégrante des données à fournir au programme pour pouvoir débiter une simulation. L'interface avec l'utilisateur se fait dans Microsoft Excel alors que les calculs nécessaires à la simulation sont effectuées dans Microsoft FoxPro (Figure 8).

Les mesures effectuées à l'automne 1987 dans les blocs Fort et Faible et à l'automne 1989 dans les blocs Moyen et Témoin ont été utilisées afin d'initier les simulations dans les quatre blocs. La date finale des simulations a été fixée à l'automne 1995, date des dernières mesures réalisées dans le dispositif. Une sauvegarde des valeurs simulées a également été réalisée au moment des autres périodes de mesures, c'est-à-dire automnes 1989 et 1991. Dans ce qui suit, les dates font référence au début de la saison de croissance suivante. L'automne 1987 correspond ainsi au printemps 1988 et les automnes 89, 91 et 95 aux printemps 90, 92 et 96.

La validation a consisté à comparer les valeurs observées aux valeurs prédites par les simulations dans les quatre blocs à l'échelle du peuplement, des distributions des diamètres et des hauteurs et des arbres.

⁵ Ung C.-H. Ung et Raulier, F., 1995. Dynamique dendrométrique de l'érable à sucre dans la région du Bas-Saint-Laurent (Comté de Témiscouata). Rapport d'avancement, Centre de foresterie des Laurentides, Service canadien des forêts, Ste-Foy, 32 p. + figures.

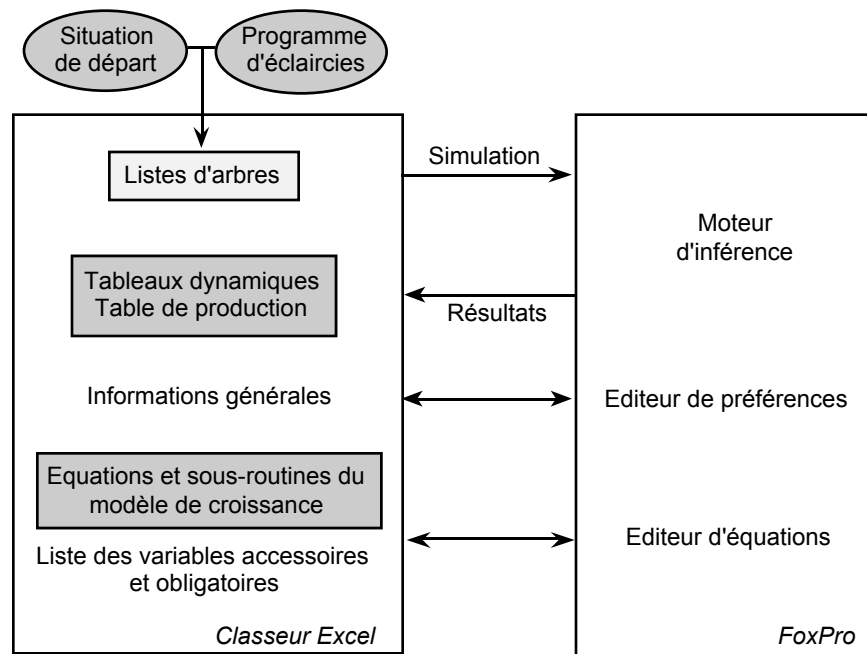


Figure 8: Principes de fonctionnement du logiciel de simulation

4.4 Validations à l'échelle du peuplement

Vu l'absence de répétitions des traitements dans le dispositif, seule une appréciation visuelle peut être effectuée à l'échelle du peuplement (Fig. 9). Celle-ci s'est effectuée présentement sur la surface terrière sans écorce à l'hectare et sur le diamètre moyen quadratique du peuplement. Aucun écart "appréciable" n'apparaît à la Fig. 9.

Il est intéressant de remarquer que du fait d'une légère différence des densités ainsi que des dimensions dans les quatre blocs, le positionnement du bloc Moyen change relativement à ceux des autres blocs. Celui-ci s'aligne sur le bloc Fort en référence à la surface terrière alors qu'en termes de diamètre moyen, il s'insinue entre les blocs Faible et Témoin (Fig. 9).

Il est également important de souligner la légère différence entre les valeurs observées et prédites dans le bloc Témoin (Fig. 9). Bien que les validations aux autres échelles dans ce bloc ne montrent pas de différences significatives en terme de distribution des diamètres ou de croissance en surface terrière (points 4.5 et 4.6), cette différence ne pourra que s'accroître avec le temps. En effet, une mortalité relativement importante a été observée dans le bloc, alors que celle-ci n'est pas prise en compte par le modèle de croissance présenté au point 3.

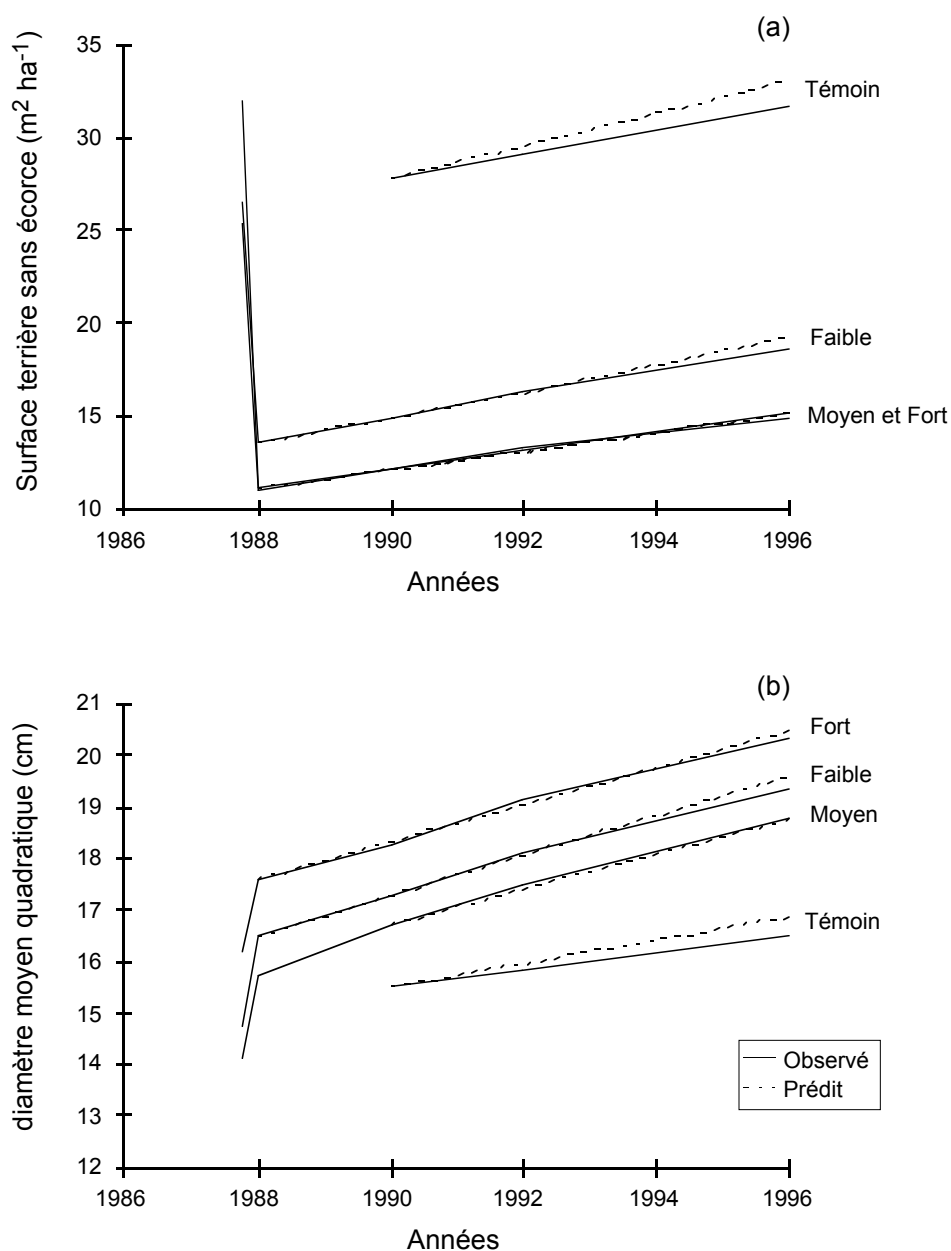


Figure 9: Evolution de la surface terrière sans écorce (a) et du diamètre moyen quadratique (b) dans les 4 blocs.

4.5. Validations à l'échelle des distributions

Les distributions des diamètres à 1.30 m et des hauteurs, mesurés et prédites en 1996, ont été comparées dans les quatre blocs à l'aide de tests d'homogénéité des distributions (Dagnélie 1975). Afin de mieux apprécier ces résultats, les mêmes distributions mesurées ont été comparées aux distributions initiales, juste après l'éclaircie. Vu le nombre de comparaisons effectuées (8 + 8 comparaisons), la correction de Bonferroni (Kirk 1982) a été appliquée aux niveaux de signification des tests de façon à diminuer le risque d'erreur de seconde espèce (Tableau 1, Figs. 10 et 11).

Tableau 1: Comparaisons des distributions des diamètres à 1.3 m (dhp) et des hauteurs (Ht). Les distributions observées en 1996 ont été comparées à celles prédites en 96 par le modèle de croissance et à celles observées en 1988 (blocs Fort et Faible) ou 1990 (blocs Moyen et Témoin). ν correspond aux degrés de liberté des tests effectués.

Bloc		Situation initiale		Situation prédite	
		dhp	Ht	dhp	Ht
Fort	χ^2_{obs}	40.8 *	107.1 *	21.2	7.1
	ν	9	7	9	7
Moyen	χ^2_{obs}	77.2 *	50.6 *	12.6	7.0
	ν	8	8	8	8
Faible	χ^2_{obs}	52.2 *	202.0 *	11.1	11.2
	ν	10	10	10	10
Témoin	χ^2_{obs}	4.8	10.3	7.4	15.0
	ν	7	8	7	8

* Significatif au seuil de probabilité 0.00625.

Il a donc été impossible de rejeter l'égalité des distributions observées et prédites en 1996, au seuil de signification de 0.00625 (situation prédite, Tableau 1). A l'exception du bloc Témoin, l'égalité des distributions observées en 1988 et en 1996 est rejetée dans tous les cas (situation initiale, Tableau 1).

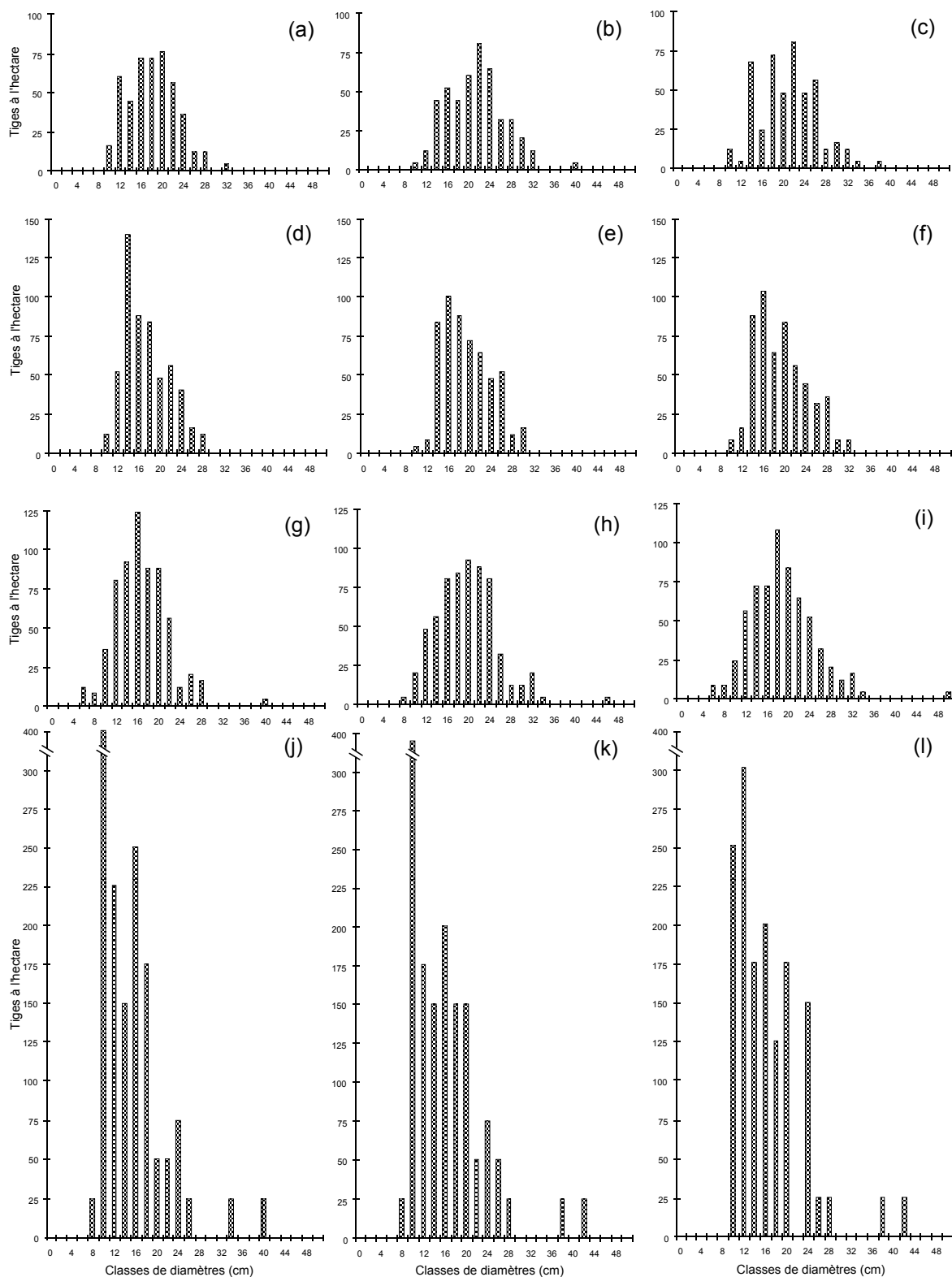


Figure 10: Comparaison des distributions des diamètres à 1.3 m dans les blocs Fort (a-c), Moyen (d-f), Faible (g-i) et Témoin (j-l). La colonne de gauche correspond aux distributions observées en 1988 pour les blocs Fort et Faible et en 1990 pour les blocs Moyen et Témoin. La colonne centrale se rapporte aux distributions observées en 1996. La colonne de droite se réfère aux distributions prédites en 1996.

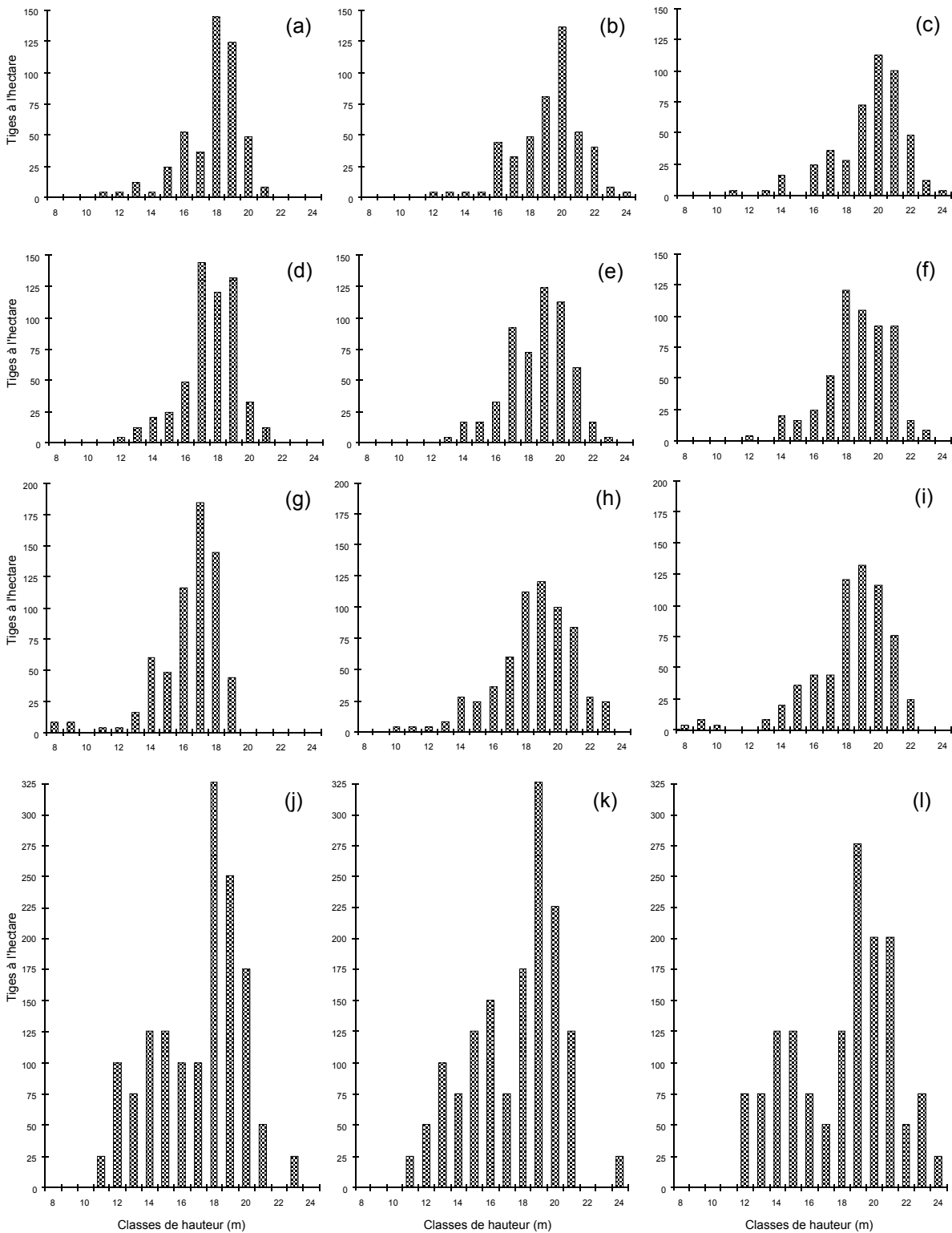


Figure 11: Comparaison des distributions des hauteurs dans les blocs Fort (a-c), Moyen (d-f), Faible (g-i) et Témoin (j-l). La colonne de gauche correspond aux distributions observées en 1988 pour les blocs Fort et Faible et en 1990 pour les blocs Moyen et Témoin. La colonne centrale se rapporte aux distributions observées en 1996. La colonne de droite se réfère aux distributions prédites en 1996.

4.5 Validation à l'échelle individuelle

Au niveau des arbres individuels, a été effectuée une comparaison des accroissements observés et prédits en surface terrière, hauteur totale et rayon moyen quadratique du houppier entre 1988 (1990) et 1996. Après avoir éliminé les valeurs “aberrantes” de la population des résidus à l'aide d'un test de signification des résidus (e.g. Kirk 1982), un coefficient de détermination généralisé (e.g. Draper et Smith 1981) a été calculé entre les valeurs observées et prédites pour les quatre blocs et les trois accroissements (Tableau 2, Figs 12 à 15). La signification du biais moyen entre valeurs observées et prédites a été testée à l'aide d'un test t . De la même façon que pour les comparaisons de distributions, la correction de Bonferroni a été appliquée afin de réduire le risque d'erreur de seconde espèce (Tableau 2).

Tableau 2: Nombre d'observations (n), coefficients de détermination généralisés, biais moyens observés entre les valeurs mesurées et prédites par les simulations entre 1988 (1990) et 1996 et valeurs “aberrantes” rejetées pour les accroissements en surface terrière (i_g , $\text{cm}^2 \text{an}^{-1}$), hauteur (i_H , m an^{-1}) et rayon moyen quadratique du houppier (i_R , m an^{-1}).

Bloc	n	Coefficient de détermination			Biais moyen			Valeurs “aberrantes”		
		i_g	i_H	i_R	i_g	i_H	i_R	i_g	i_H	i_R
Fort	104	0.66	-0.31	-0.38	0.48	-0.05	0.01	0	0	1
Moyen	120	0.31	-0.27	-0.05	0.44	-0.00	0.01	3	0	4
Faible	138	0.49	-0.08	-0.08	-0.58	0.03	0.03	1	1	0
Témoin	49	0.88	-0.19	-0.19	-0.51	-0.11 *	-0.01	0	0	1

* Significatif au seuil de probabilité 0.0042.

A l'exception de l'accroissement en hauteur pour le bloc Témoin, il n'a pas été possible de rejeter l'hypothèse d'absence de biais moyen dans la prédiction des trois accroissements. La plupart des coefficients de détermination calculés pour les accroissements en hauteur et en rayon sont négatifs. Ceci signifie que, dans les deux cas, la variance résiduelle est plus importante que la variance des accroissements observés. Une interprétation possible consiste à analyser les méthodes de mesure des hauteurs totales et des rayons moyens quadratiques. L'erreur moyenne d'une mesure de hauteur à l'aide d'un clinomètre est de 2 à 3% (Pardé et Bouchon 1988). Cette erreur ne tient pas compte de la difficulté d'observer à partir du sol la position de l'apex d'un érable à sucre. Toutefois, toutes les mesures de hauteur ont

été effectuées après la chute des feuilles. Pour un arbre de 20 m, cette erreur moyenne varie donc entre 40 et 60cm. L'erreur moyenne pour un accroissement résultant de la différence entre deux mesures de hauteur varierait ainsi entre 60 et 85 cm et équivaut à approximativement la moitié de la croissance moyenne en hauteur cumulée entre 1988 et 1996. Les mêmes considérations peuvent s'utiliser pour expliquer l'absence de corrélation entre valeurs prédites et observées pour l'accroissement moyen du rayon du houppier.

Du fait de la très haute densité du peuplement, les mesures de hauteur étaient beaucoup plus difficiles à réaliser dans le bloc Témoin, ce qui explique la forte variabilité des accroissements en hauteur observés dans ce bloc (Fig. 15). C'est également le seul bloc où des accroissements négatifs en hauteur sont observés. L'absence d'accroissements négatifs en hauteur dans les trois autres blocs peut s'expliquer par le fait que les mesures ont été faites en connaissant les hauteurs des arbres lors du mesurage précédent. Dans le bloc Témoin, les projections de cime ont été effectuées seulement pour les arbres de plus de 10 cm de dhp. D'une telle façon, une relation locale a été utilisée afin d'estimer le rayon moyen quadratique initial des arbres de moins de 10 cm. La validation de l'accroissement en rayon s'est donc faite uniquement pour les arbres disposant de mesures en 1990 et 1996.



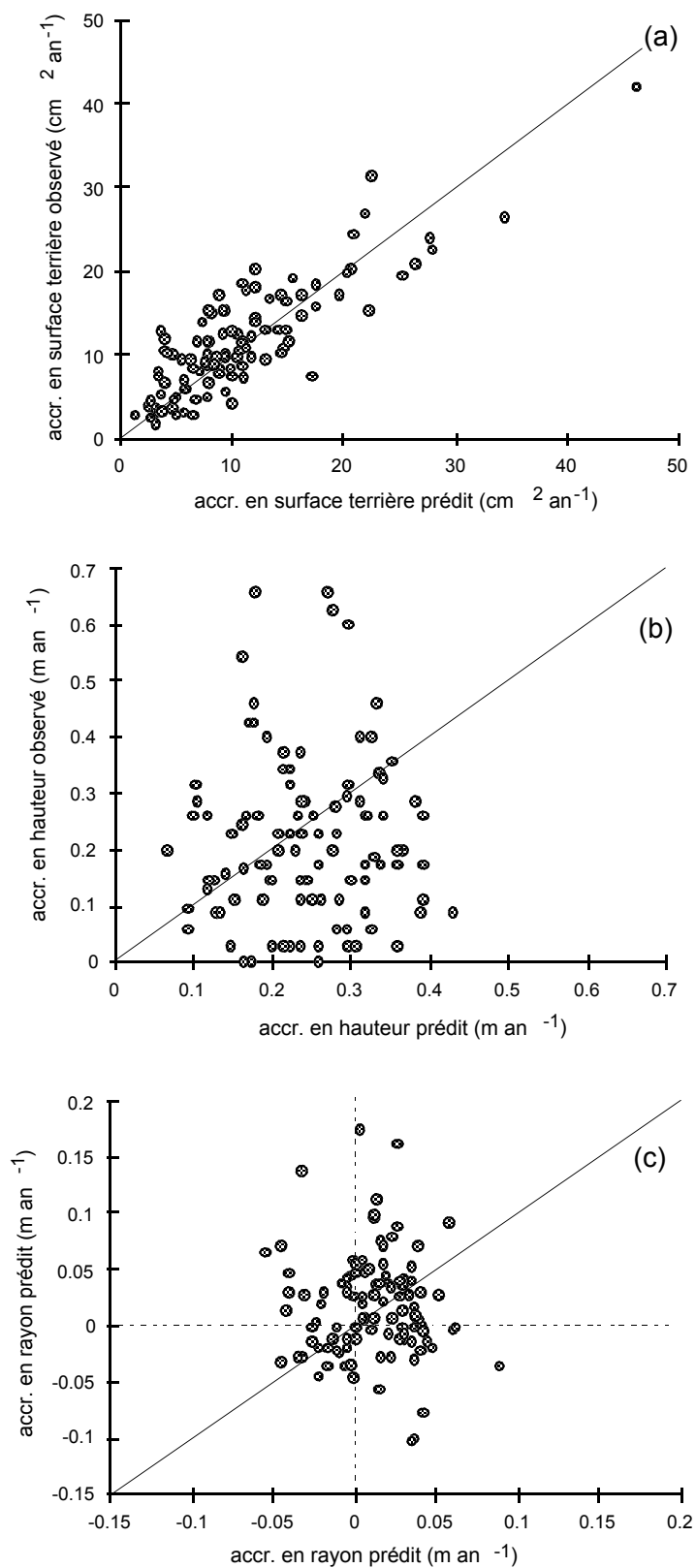


Figure 12: Accroissements observés et prédits dans le bloc Fort entre 1988 et 1996.

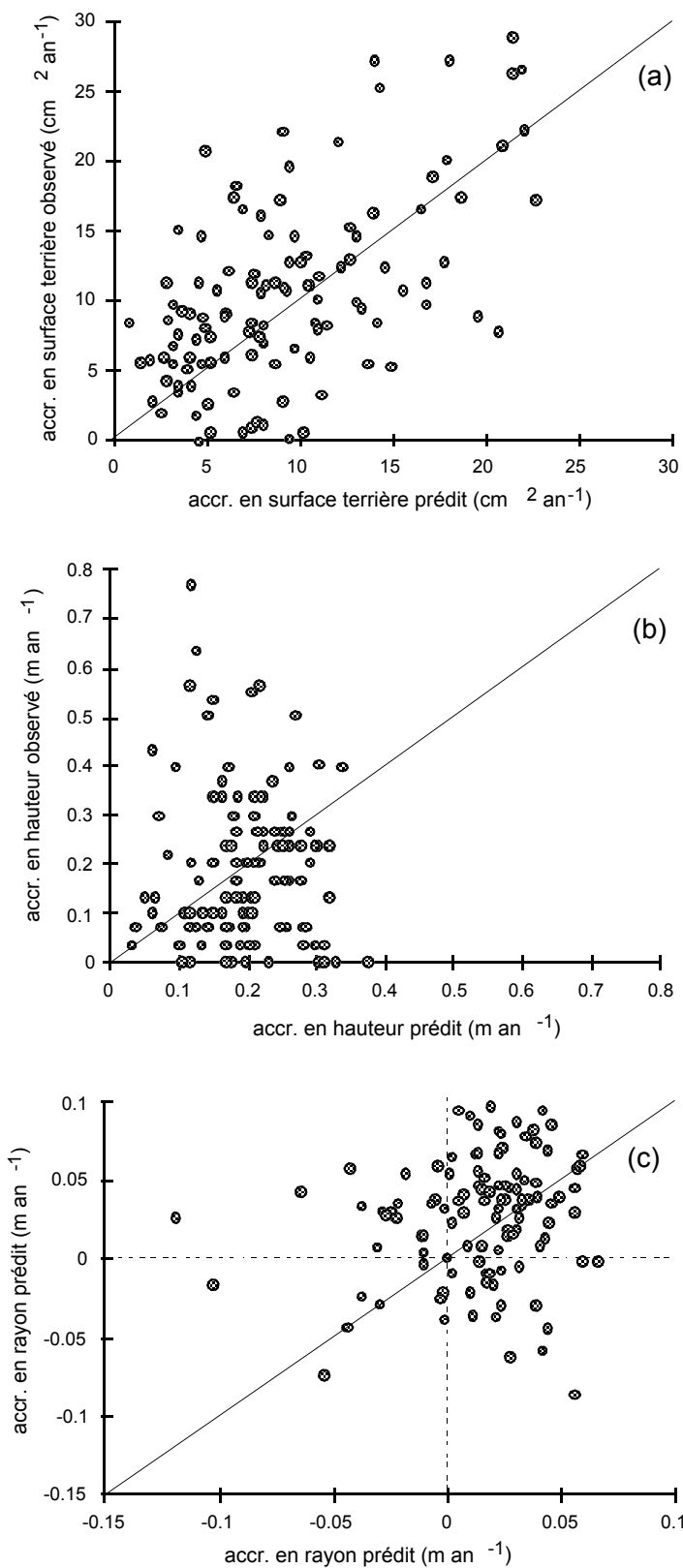


Figure 13: Accroissements observés et prédits dans le bloc Moyen entre 1990 et 1996.

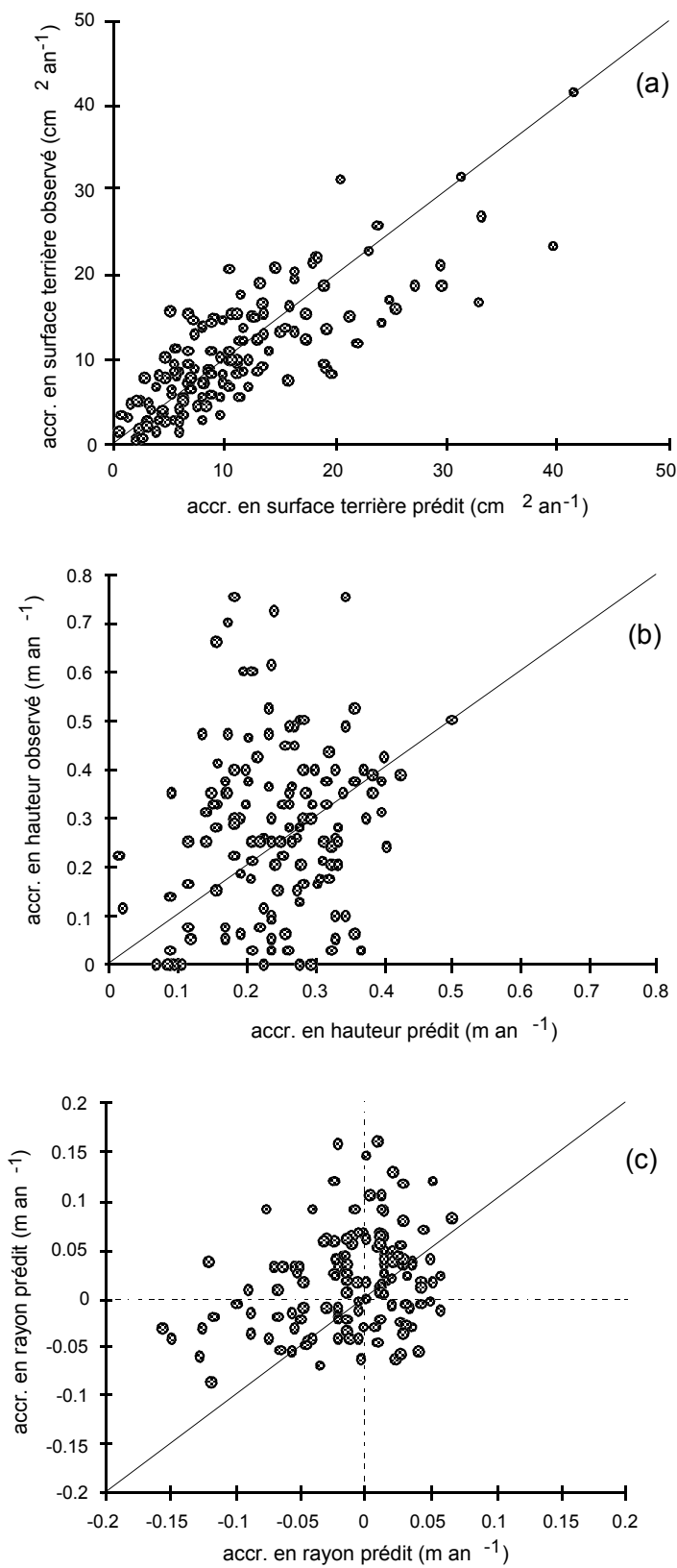


Figure 14: Accroissements observés et prédits dans le bloc Faible entre 1988 et 1996.

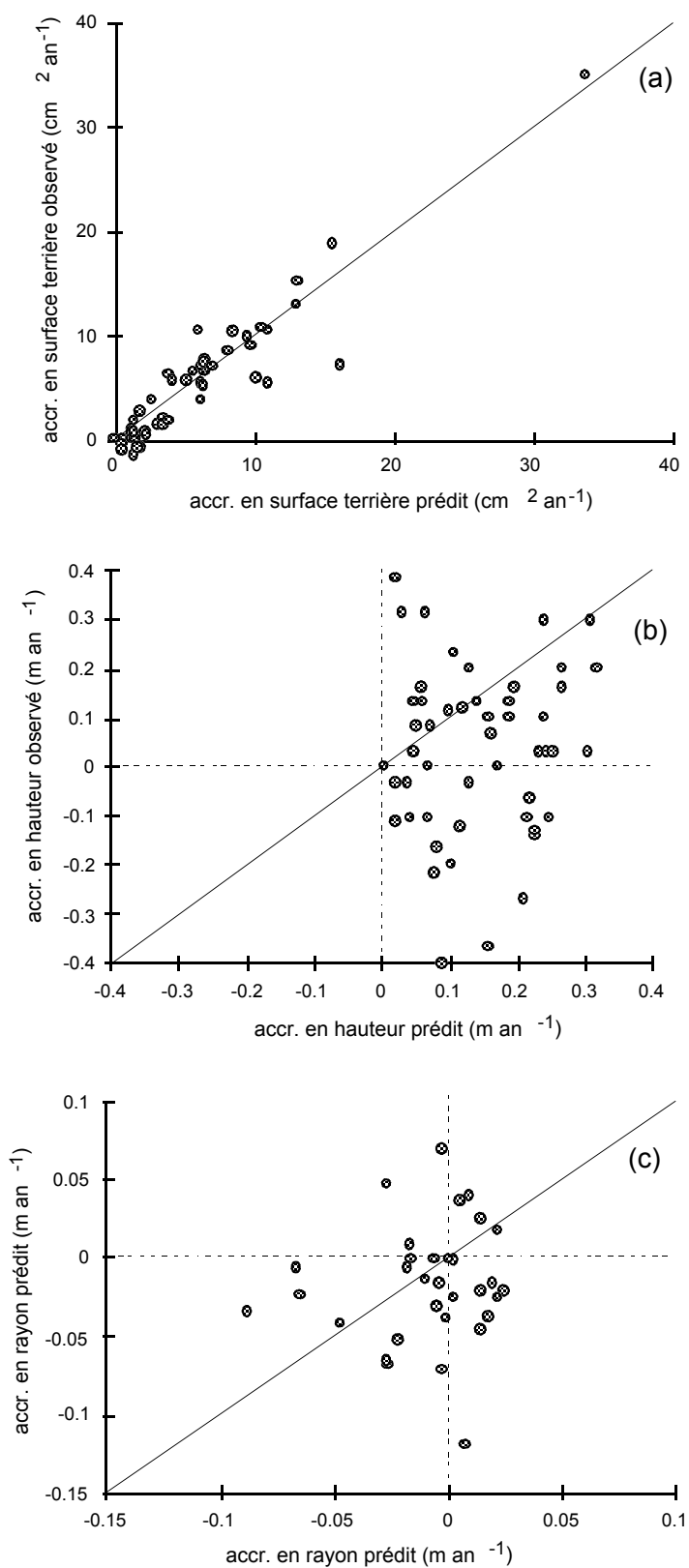


Figure 15: Accroissements observés et prédits dans le bloc Témoin entre 1988 et 1996.

5 Conclusions et perspectives

Un modèle de croissance fonctionnel a été établi sur la base de considérations sur le cycle aérien annuel du carbone dans l'arbre. Des méthodes originales ont été mises au point afin de pouvoir exprimer les variables "fonctionnelles" du modèle en fonction de variables dendrométriques plus aisément mesurables sur le terrain. Le modèle a été calibré dans 15 placettes complémentaires dans des érablières à bouleau jaune et à hêtre du comté de Témiscouata. Une validation partielle a été effectuée en comparant la croissance observée et prédite des arbres du dispositif d'éclaircie de Squatec.

Il faut rappeler que le modèle de croissance a été calibré dans des placettes situées en forêts publiques ne subissant pas de programme d'éclaircie, alors que la validation concerne justement la réaction de la croissance aux éclaircies. A la vue de cette validation, la démarche utilisée, notamment l'approche fonctionnelle, semble être une voie très intéressante à explorer. Toutefois, la présente validation n'assure pas totalement le fonctionnement du modèle.

Il importe de rappeler également que le modèle de croissance a seulement été calibré pour l'érable à sucre. Bien qu'il soit potentiellement destiné à être utilisé dans des peuplements de structure irrégulière et mixtes, son utilisation est conditionnée à sa calibration pour les autres essences présentes dans les érablières à bouleau jaune et à hêtre du Témiscouata.

Il reste encore trois écarts importants entre la démarche proposée dans cette étude et l'outil de gestion désiré. D'une part, le modèle nécessite la prise de données qui sont rarement mesurées en pratique. Il s'agit de la hauteur totale, du rayon et de la longueur du houppier. Cet écart pourrait être diminué en effectuant des simulations et des exercices d'échantillonnage afin de montrer jusqu'à quel point un sous-échantillon de mesures permet de pallier à ce problème. Le deuxième écart se situe dans le rôle central que joue l'obstruction physique des houppiers dans le modèle de croissance et donc la position cartographique des arbres. Comme nous l'avons vu avec l'éclaircie faite dans le dispositif de Squatec, le type d'éclaircie pratiqué et la présence d'individus à cime très ample ont une influence certaine sur la disposition des arbres après éclaircie. A moins de disposer de méthodes de mesures beaucoup moins exigeantes en temps que la méthode topométrique utilisée jusqu'à présent (distance, pente et azimuth), il serait nécessaire d'entreprendre une étude sur la dispersion et la position cartographique des arbres en peuplement naturel. Finalement, le troisième écart concerne la prise en considération

de la mortalité dans le modèle de croissance. Puisque le modèle de croissance a été calibré dans des placettes temporaires, il n'était pas possible d'en tenir compte. Le phénomène de mortalité peut en effet seulement s'observer dans des dispositifs permanents ou semi-permanents comme c'est le cas avec les placettes permanentes du Ministère des Ressources Naturelles du Québec. L'utilisation de ces placettes pour une étude sur la mortalité requiert au préalable la résolution des deux autres écarts, c'est-à-dire ceux de la prise de mesures sur le houppier et de la position cartographique des arbres dans les placettes.

6 Bibliographie

- Carmean, W.H., Hahn, J.T., et Jacobs, R.D., 1981. Site index curves for forest tree species in the Eastern United States. Gen. Tech. Rep. NC-128. USDA For. Serv. North Central Forest Exp. Stn., St. Paul, MN, 142 pp.
- Causton, D.R., et Venus, J.C., 1981. The biometry of plant growth. Edward Arnold, Londres.
- Dagnélie, P., 1975. Théorie et méthodes statistiques. Volume 2. Deuxième édition. Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique.
- Demaerschalk, J.P., et Kozak, A. 1977. The whole bole system: a conditioned dual-equation system for precise prediction of tree profiles. Can. J. For. Res., 7: 488-497.
- Draper, N.R., et Smith, H., 1981. Applied regression analysis. John Wiley & sons. New York
- Ellsworth, D.S., et Reich, P.B., 1993. Canopy structure and vertical patterns of photosynthesis and related leaf traits in a deciduous forest. Oecologia, 96: 169-178.
- Inose, M., 1982. A tree growth model based on the crown competition of Todomatsu (*Abies sachalinensis*). 1- The relationship between crown development and volume increment. Bulletin of the forestry and forest products research institute, 318: 103-127.
- Kaufman, M.R., 1990. Ecophysiological processes affecting tree growth: water relationships. In: Process modeling of forest growth responses to environmental stress. R.K. Dixon, R.S. Meldahl, G.A. Ruark et W.G. Warren (Editeurs). Timber Press, Portland, Oregon, pp 64-78.

- Kirk, R.E., 1982. Experimental design: procedures for the behavioral sciences. Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove, Ca.
- Maguire, D.A., et Hann, D.W., 1989. The relationship between gross crown dimensions and sapwood area at crown base in Douglas-fir. *Can. J. For. Res.*, 19: 557-565.
- Mäkelä, A., 1986. Implications of the pipe-model theory on dry matter partitioning and height growth in trees. *J. Theor. Biol.*, 123:103-120.
- Mäkelä, A., 1990. Modeling structural-functional relationships in whole-tree growth: resource allocation. In: Process modeling of forest growth responses to environmental stresses. R.K. Dixon, R.S. Meldahl, G.A. Ruark and W.G. Warren (Editeurs), Timber Press, Portland, Oregon, pp 81-95.
- Mäkelä, A., et Albrektson, A., 1992. An analysis of the relationship between foliage biomass and crown surface area in *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scand. J. For. Res.* 7: 297-307.
- Max, T.A., et Burkhart, H.E., 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. *For. Sci.*, 22: 283-289.
- McMurtrie, R., et Wolf, L., 1983. Above- and Below-ground growth of forest stands: a carbon budget model. *Ann. Bot.*, 52: 437-448.
- Ministère des Ressources Naturelles 1992. Manuel d'aménagement forestier. Gouvernement du Québec, Québec.
- Mitchell, K.J., 1969. Simulation of growth of even-aged stands of white spruce. *Yale Univ Sch For Bull* 75, 48 p.
- Mitchell, K.J., 1975. Dynamics and simulated yield of Douglas-fir. *For. Sci. Monogr.* 17, Society of American Foresters, 39 pp.
- Morgan, J., et Cannell, M.G.R., 1994. Shape of tree stems - a re-examination of the uniform stress. *Tree Phys.*, 14: 49-62.
- Nikinmaa, E., 1992. Analyses of the growth of Scots pine; matching structure with function. *Acta Forestalia Fennica*, 235.

- Norman, J.M., 1979. Modeling the complete crop canopy. In: Modification of the aerial environment of plants. B.J. Barfields et J.F. Gerber (Editeurs). A.S.A.E. Monograph, A.S.A.E., St. Joseph (MI). pp. 249-277.
- Pardé, J., et Bouchon, J., 1988. Dendrométrie. Seconde édition. ENGREF, Nancy, France.
- Pienaar, L.V., et Turnbull, K.J., 1973. The Chapman-Richards generalization of von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. For. Sci., 19: 2-22.
- Prentice, I.C., et Leemans, R. 1990. Pattern and process and the dynamics of forest structure: a simulation approach. Journal of Ecology, 78: 340-355.
- Raulier, F., Ung, C.-H., et Ouellet, D., 1996. Influence of social status on crown geometry and volume increment in regular and irregular black spruce stands. Can. J. For. Res., 26: 1742-1753.
- Rondeux, J. 1993. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Presses agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgique.
- Ryan, M.G. 1990. Growth and maintenance respiration in stems of *Pinus contorta* and *Picea engelmannii*. Can. J. For. Res., 20: 48-57.
- Ryan, M.G., Hubbard, R.M., Clark, D.A., et Sanford, R.L., Jr. 1994. Woody-tissue respiration for *Simarouba amara* and *Minquartia guianensis*, two tropical wet forest trees with different growth habits. Oecologia, 100: 213-220.
- Ryan, M.G., Gower, S.T., Hubbard, R.M., Waring, R.H., Gholz, H.L., Cropper, W.P. and Running, S.W. 1995. Woody tissue maintenance respiration of four conifers in contrasting climates. Oecologia, 101: 133-140.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., and Kira, T., 1964. A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory. I. Basic Analyses. Jpn. J. Ecol., 14: 97-105.
- Thornley, J.H.M., et Johnson, I.R., 1990. Plant and crop modelling. Clarendon Press, Oxford.
- Wilson, J.B., 1988. A review of evidence on the control of shoot:root ratio, in relation to models. Ann. Bot., 61: 433-449.

Waring, R.H., Thies, W.G., et Muscato, D., 1980. Stem growth per unit of leaf area: a measure of tree vigor. *For. Sci.*, 26: 112-117.

Zeide, B., et Pfeifer, P., 1991. A method for estimation of fractal dimension of tree crowns. *For. Sci.*, 37: 1253-1265.

