

Frédéric Raulier

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

Rapport d'avancement

Faculté de Foresterie et de Géomatique
Université Laval

Sainte-Foy
Octobre 1995

Table des matières

1. Introduction	1
2. Modèle de croissance	3
2.0. Cadre conceptuel.....	3
2.1. Hypothèses.....	3
a. Croissance.....	3
b. Qualité.....	4
2.2. Données.....	4
2.3. Croissance en hauteur.....	6
a. Croissance en hauteur des dominants.....	6
b. Croissance en hauteur.....	7
c. Arbres “parois”.....	8
2.4. Croissance en volume.....	9
a. Généralités.....	9
b. Modèle de croissance en volume.....	10
c. Equation de cubage.....	11
d. Surface terrière et accroissement en surface terrière.....	11
2.5. Branchaison.....	12
a. Branchaison du houppier de lumière.....	12
b. Paramètres morphométriques du houppier de lumière.....	13
3. Logiciel de croissance DendroSim	15
3.1. Spécification du modèle de croissance.....	16
a. Types de variables à l'initialisation.....	16
b. Types de variables pendant la simulation.....	17
c. Ordre de calcul des variables.....	18
d. Forme des équations.....	18
e. Exemple.....	19
3.2. Un scénario par classeur.....	20

3.3. Initialisations.....	21
a. Réglages initiaux.....	21
b. Feuille de données.....	22
3.4. Simulation.....	23
3.5. Résultats.....	23
a. Table de production.....	23
b. Liste des résultats.....	23
c. Tableau de synthèse des résultats.....	23
4. Validation	24
4.1. Généralités sur le dispositif d'éclaircie.....	24
4.2. Bloc "faible".....	25
4.3. Bloc "fort".....	26
5. Conclusions	27
6. Références bibliographiques	28
Annexe 1. Mesures effectuées dans les placettes complémentaires en 1994.	32

1. Introduction

Les érablières représentent une proportion importante des ressources forestières du Groupement Forestier de l'Est du Lac Témiscouata. A peu près 77% de la superficie des peuplements marchands du Groupement sont en effet occupés par des peuplements feuillus et mélangé 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).

D'après le dernier inventaire effectué par le Ministère des Ressources Naturelles en 1985-1986 et au sein de la région écologique 4a au Témiscouata (Thibault, 1985), l'érable à sucre se retrouve dans des types forestiers nombreux qui occupent 44% de la superficie forestière et dont la structure est très diverse. L'érable à sucre se rencontre en effet dans l'érablière à feuillus tolérants (20% de la surface forestière), l'érablière à sucre pure (9%), l'érablière à bouleau jaune (9%), le feuillu tolérant (3%) et l'érablière à résineux (3%). A l'exception de l'érablière à sucre pure, c'est-à-dire dans 80% des cas, l'érable à sucre contribue en moyenne pour 35% de la surface terrière marchande.

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.

Aux abords de la forêt boréale, les érablières du Témiscouata représentent des écosystèmes naturels particulièrement riches en faune et en flore. La définition d'une sylviculture en harmonie avec l'intégrité, la santé et la diversité de ces écosystèmes forestiers suppose une connaissance approfondie de leur différentes composantes et de leur dynamique. Comment définir des prescriptions sylvicoles qui permettent à la fois de satisfaire les besoins socio-économiques et de respecter l'intégrité des érablières à bouleau jaune ou à hêtre de la région ? Comment interagissent les différentes espèces forestières, certaines sont plus agressives que d'autres, quel est l'effet de leur compétition mutuelle ?

Tous ces facteurs nous ont menés à envisager l'élaboration d'un modèle de croissance qui considère la croissance d'arbres individuels et basé sur une compréhension partielle du processus de la croissance. La modélisation de la croissance est ainsi abordée par le développement du houppier et comme nous le verrons ultérieurement, cette approche offre plusieurs avantages. Un modèle de croissance nécessite un support pour permettre son utilisation par des gestionnaires forestiers. Un outil de gestion sous forme de logiciel a donc été élaboré. Le présent rapport se divise ainsi en trois parties. La première et la deuxième parties s'attachent à décrire respectivement le modèle de croissance et le logiciel. Le troisième volet analyse les premiers résultats obtenus.

Il faut rappeler que le présent projet s'effectue dans le cadre d'une thèse de doctorat à l'Université Laval et qu'il se réalise grâce à l'appui technique et financier de la Forêt modèle du Bas-Saint-Laurent, du Service de Comptabilité Forestière 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. Initié en 1994, celui-ci doit s'étendre sur trois ans. Il en est donc à sa deuxième année de fonctionnement et les résultats qui sont présentés dans ce rapport sont préliminaires.

2. Modèle de croissance

2.0. Cadre conceptuel

Le cadre conceptuel du modèle de croissance est fourni à la figure 1. L'arbre représente l'unité élémentaire du modèle. L'approche se fait par la croissance en hauteur et le développement du houppier. Cette approche fournit plusieurs avantages:

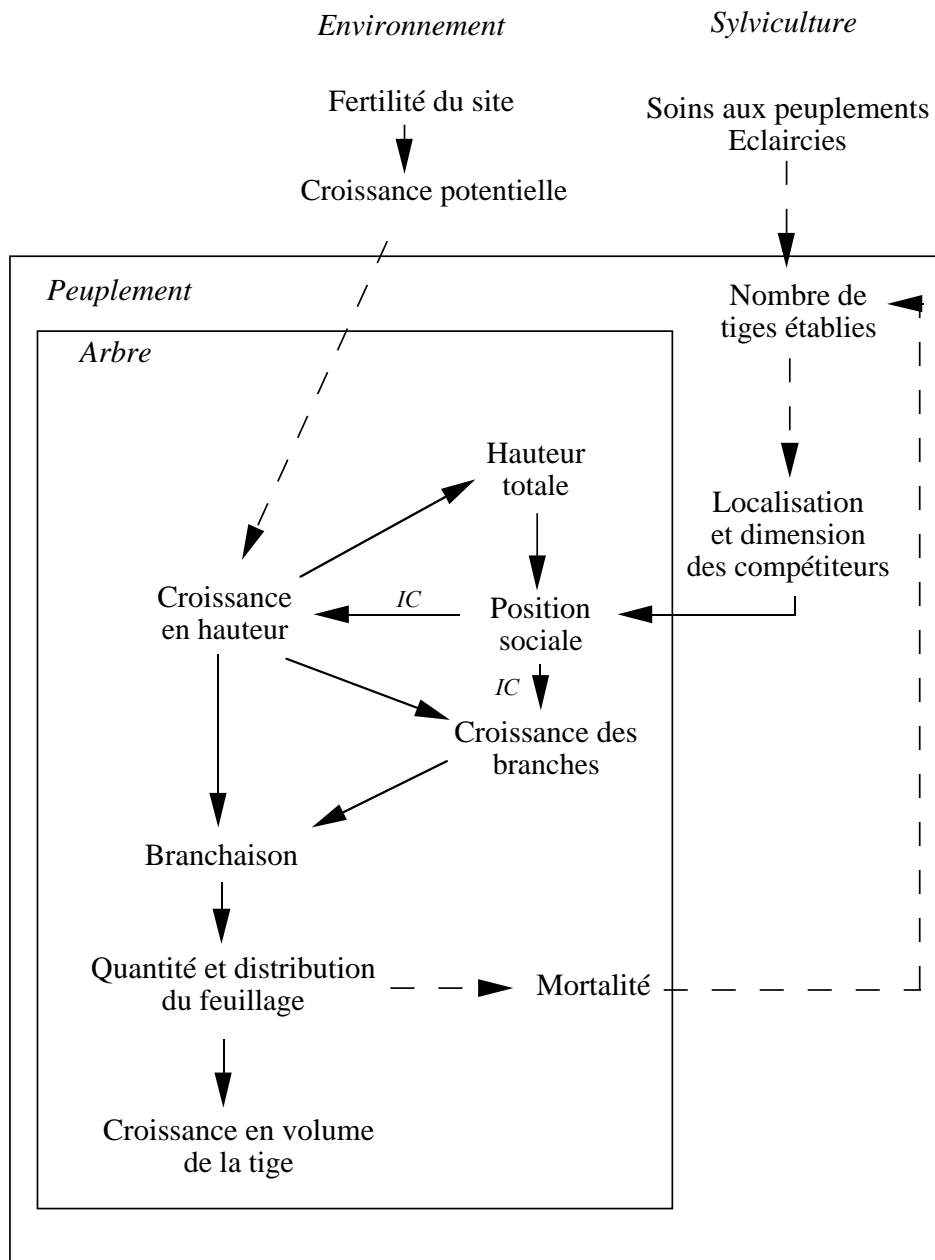
- 1.- Le houppier supporte l'appareil photosynthétique de l'arbre. Son développement est limité d'une part par la présence physique des arbres voisins mais aussi par la quantité de lumière qui est mise à sa disposition. Il est donc plus facile d'analyser l'influence de la présence d'espèces et d'étages multiples.
- 2.- La mise en lumière est l'outil principal du gestionnaire lorsqu'il intervient dans ses peuplements. Elle intervient d'abord sur la croissance de l'appareil photosynthétique et donc du houppier, puis secondairement sur la croissance en volume de la tige. L'approche qui est proposée fournit donc une voie analytique pour étudier l'impact de l'éclaircie sur la croissance en volume.
- 3.- Les érablières subissent de façon chronique le passage d'insectes défoliateurs. Une connaissance de l'appareil photosynthétique permet d'envisager directement l'analyse de l'impact des dégâts causés par ces ravageurs forestiers.
- 4.- La dynamique de croissance et de remontée du houppier régit non seulement l'importance de l'allocation de la production totale à la tige, mais aussi sa qualité (épaisseur des cernes, nodosités).

2.1. Hypothèses

Le modèle de croissance qui est présenté repose sur un certain nombre d'hypothèses générales quant à la croissance en volume de l'érable à sucre et de la qualité des produits à attendre. Celles-ci se divisent en deux rubriques, l'une sur la croissance et l'autre sur la qualité des produits.

a. Croissance

Une fois terminée la phase de compétition avec la végétation adventice, c'est-à-dire à partir du stade du gaulis, il est possible de prédire adéquatement la



IC : Indice de compétition

Figure 1 : Définition du cadre conceptuel

croissance en volume d'un érable à sucre, quelque soit son statut social et le peuplement dans lequel il se développe.

- Dans un site écologiquement homogène, la disponibilité en lumière est le facteur principal qui affecte la croissance en volume d'un arbre;
- La disponibilité en lumière pour un arbre donné est déterminé d'abord par la présence d'arbres voisins du premier ordre, par la taille et les caractéristiques optiques de leurs houppier;
- Il existe une relation univoque entre la surface foliaire et la croissance en volume de la tige;
- Il existe une relation allométrique entre la surface foliaire et des paramètres morphométriques du houppier, tels que son rayon ou sa longueur.

b. Qualité

A partir d'une description initiale d'une surface de peuplement, il est possible, à partir des hypothèses de croissance précédemment vérifiées, de prévoir de façon satisfaisant à court ou à moyen terme la structure du peuplement et celle des arbres.

- La croissance en hauteur détermine de façon directe la croissance des branches et les caractéristiques de la branchaison;
- La connaissance de la branchaison permet de prédire le défilement de la tige;
- Il existe une relation entre la surface foliaire distribuée sur une branche et la position de la branche dans le houppier, la compétition subie par l'arbre et la fertilité stationnelle;
- La connaissance de la surface foliaire sur une branche permet de prédire sa mortalité et donc la hauteur d'élagage naturel.

2.2. Données

Le modèle qui est présenté dans ce document repose sur l'analyse de données recueillies au cours de l'été 1994 dans 9 placettes complémentaires situées en forêt publique et aux alentours du territoire du Groupement (trois gaulis, trois perchis et trois futaies, figure 2). Leur localisation s'est faite à partir des dernières placettes temporaires mesurées en 1985-86 par le M.R.N. sur les terres publiques de la région écologique 4a. A partir de 474 placettes temporaires situées dans la région, ont été retenues celles appartenant aux types forestiers les plus représentatifs

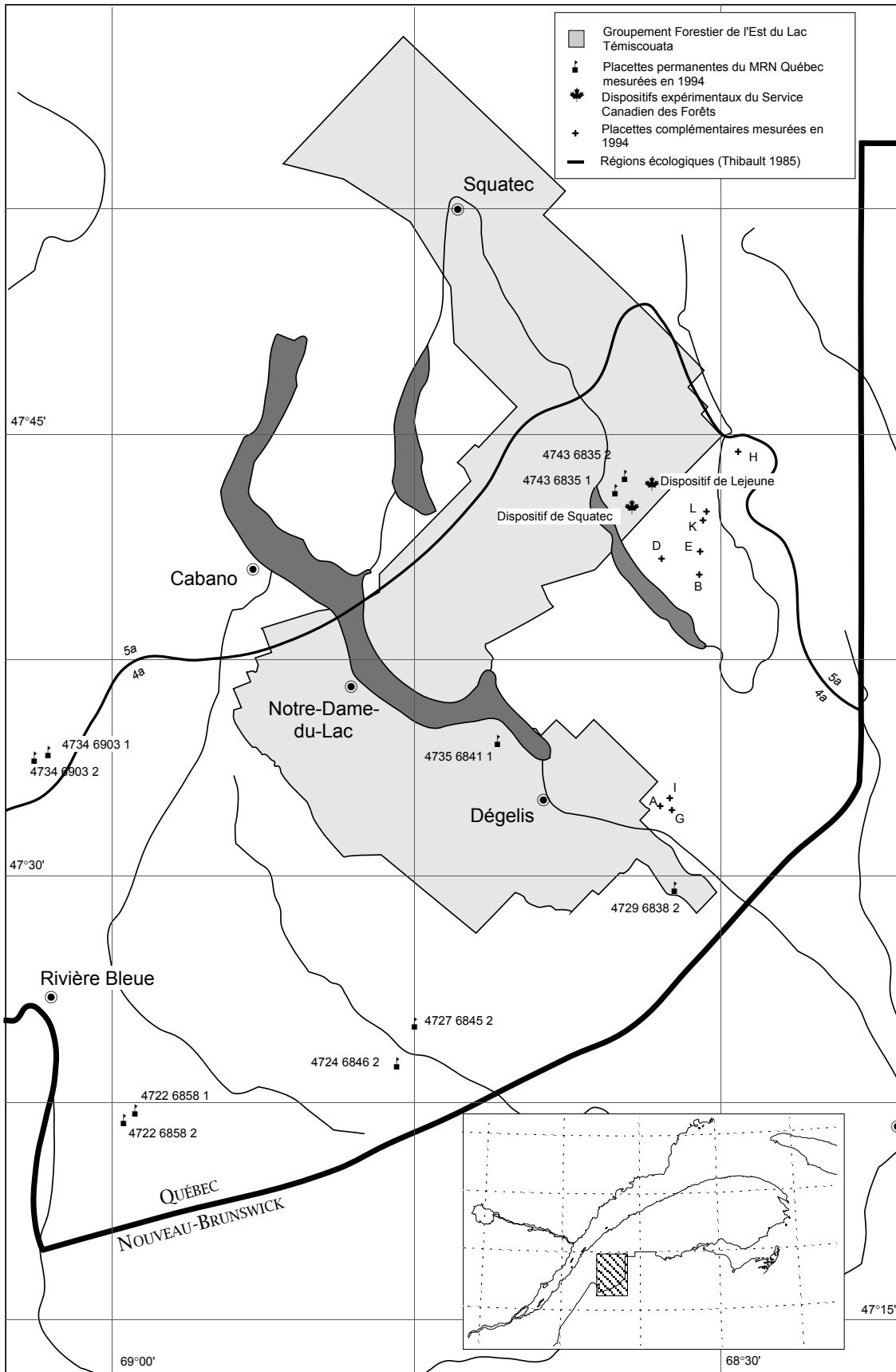


Figure 2: Emplacement des placettes complémentaires

(érablière pure, à bouleau jaune et à feuillus tolérants) pour éviter les types fortement perturbés (érablières à peuplier et à feuillus intolérants) et ceux mélangés à des résineux (érablières à résineux). Les placettes temporaires ont été ensuite classées par type forestier et en trois grandes classes de diamètre moyen (gaulis, perchis et futaie) pour représenter une population stratifiée à échantillonner. Les 9 placettes complémentaires, sélectionnées parmi cette population se situent ainsi dans des densités représentatives de la région (figure 3). La présence de l'érabler à sucre y varie entre 38% et 97% de la surface terrière totale de chaque placette (figure 4). Les mesures effectuées dans ces placettes sont décrites en détails à l'annexe 1.

Tout comme le montre la figure 1, le modèle de croissance se consitue d'un ensemble de sous-modèles interconnectés et qui seront décrits au cours des paragraphes suivants. Il s'agit principalement de la croissance en hauteur, de la croissance en volume de la tige, et enfin de la description de la branchaison et de sa dynamique. Le tableau 1 fournit la liste des variables et des symboles utilisés dans ce document

TABLEAU 1: Liste des variables utilisées dans le document

Symbole	Variable	Unités
∇_H	Gradient de hauteur	[m/m]
ε	Taux d'assimilation apparent	[m ³ /MJ]
λ_a	Coefficient d'allocation de la production totale annuelle à la partie aérienne	-
λ_t	Coefficient d'allocation de la production annuelle aérienne à la tige	-
D	Dimension fractale du houppier	-
dhp	Diamètre à hauteur de poitrine (avec écorce)	[cm]
d _{n.s}	Distance entre deux souches d'arbres	[m]
g	Surface terrière d'un arbre (sous écorce)	[dm ²]
H	Hauteur totale	[m]
H _{dom}	Hauteur dominante	[m]
h	Distance entre l'apex de l'arbre et la base d'insertion d'une branche	[m]
h _{hl}	Longueur du houppier de lumière	[m]
i _b	Elongation annuelle d'une branche [†]	[m/an]
i _g	Accroissement en surface terrière (sous écorce) [†]	[dm ² /an]

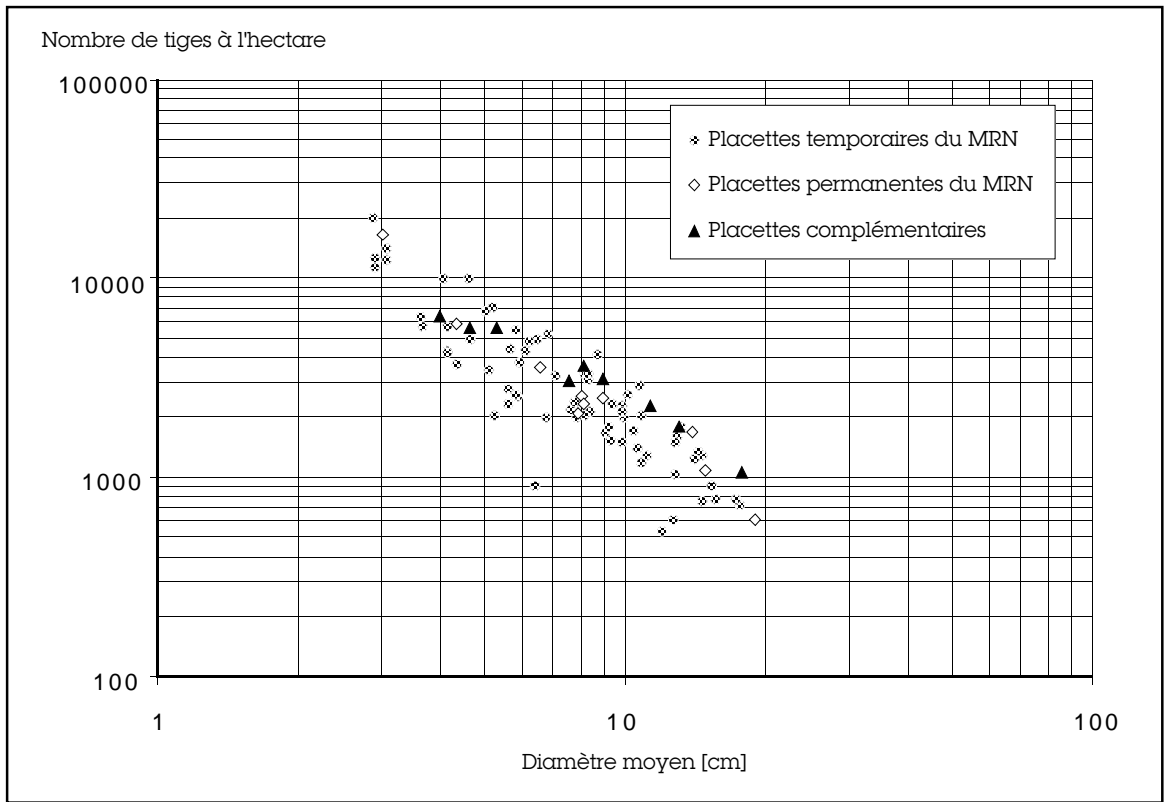


Figure 3 : Nombre de tiges à l'hectare en fonction du diamètre moyen. Echelle logarithmique

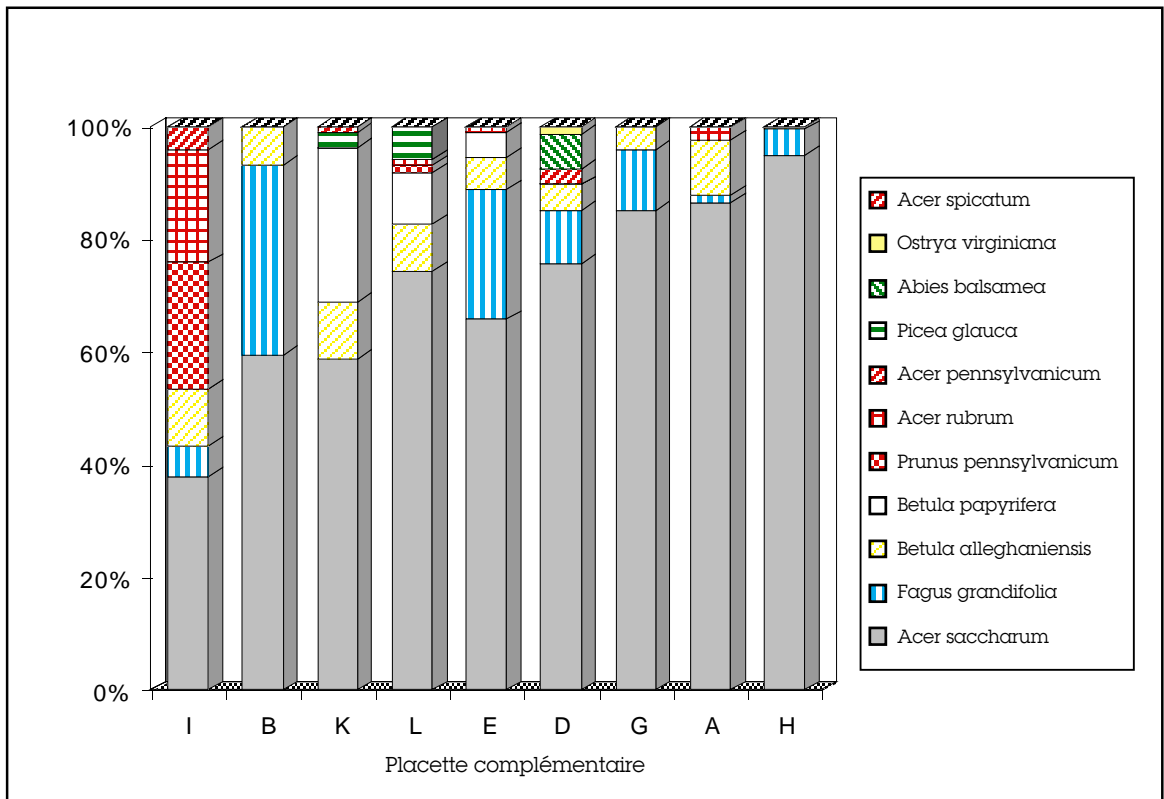


Figure 4 : Répartition de la surface terrière à l'hectare par espèce. Placettes complémentaires.

i_h	Accroissement en hauteur [†]	[m/an]
I_h	Quantité de lumière incidente perçue par unité de surface et par an	[MJ/m ² /an]
$i_{h,pot}$	Accroissement potentiel en hauteur [†]	[m/an]
IQS	Indice de qualité de station	[m]
i_v	Accroissement en volume de la tige (sous écorce) [†]	[dm ³ /an]
LA	Surface foliaire	[m ²]
l_b	Longueur d'une branche	[m]
R	Rayon moyen du houppier	[m]
S_{hl}	Surface du houppier de lumière	[m ²]
v	Volume de la tige principale (sans écorce)	[dm ³]

[†] Il s'agit d'un accroissement annuel courant calculé sur les 5 dernières années.

2.3. Croissance en hauteur

a. Croissance en hauteur des dominants

La croissance en hauteur des arbres dominants et codominants est le caractère dendrométrique le plus insensible aux variables qui influencent la production (Lanner 1985). La productivité d'une station forestière et l'origine génétique du peuplement sont donc fréquemment exprimés par l'indice de qualité de station (IQS). Cet indice se définit comme étant la hauteur dominante atteinte à l'âge de 50 ans ou l'accroissement annuel moyen en hauteur à l'âge de 50 ans. Jusqu'à ce jour, aucunes courbes de productivité n'ont été élaborées pour l'éérable à sucre au Québec à partir d'analyses de tige (Carpentier 1987). Il faut donc se rabattre sur celles publiées par Carmean *et al.* (1981) préparées pour la région des Grands Lacs aux Etats-Unis.

Tel qu'utilisé normalement, l'IQS ne fonctionne que lorsque les dominants l'ont toujours été (Monserud 1984). Dans le comté du Témiscouata, l'éérable à sucre est une essence tolérante à l'ombre qui peut rester de longues années sous le couvert. De plus, après une mise en lumière par une coupe par exemple, d'autres essences plus héliophiles, telles que le cerisier de Pennsylvanie, l'éérable à épis, l'éérable de Pennsylvanie, le peuplier tremble ou le bouleau à papier prennent le dessus. L'âge des arbres dominants à la souche ou au dhp perd ainsi son sens pour estimer la productivité stationnelle. Dans des conditions naturelles donc, l'éérable à sucre subit au moins deux phases de suppression qui empêchent l'utilisation de l'IQS.

Il n'en reste pas moins que lorsque les houppiers des arbres ont récupérés de leur phase de suppression, la croissance en hauteur des arbres dominants reste dans certaines limites insensible à la compétition et dépend encore de la fertilité stationnelle et des origines génétiques. Il est ainsi possible de déduire l'IQS indépendamment de l'âge, à partir des courbes de productivité élaborées par Carmean *et al* (1981) pour l'érabler à sucre. En prenant la dérivée première de ces courbes par rapport à l'âge et en substituant l'âge par la hauteur avec l'aide de l'équation originale, on obtient:

$$[1] \quad i_{h.pot} = \frac{\partial H}{\partial A} = -b_3 b_4 \text{IQS}^{b_5} H \left(\left(\frac{H}{b_1 \text{IQS}^{b_2}} \right)^{\frac{-\text{IQS}^{-b_5}}{b_4}} - 1 \right)$$

Les paramètres b_1 à b_5 sont fournis par Carmean *et al* (1981). L'équation 1 permet de calculer l'IQS lorsque les derniers accroissements en hauteur (5 ou 10 derniers accroissements) et la hauteur des arbres dominants sont connus (figure 5).

b. Croissance en hauteur

La modélisation de la croissance en hauteur des autres arbres du peuplement s'appuie sur le paradigme de Baule (1917, *in* Biging et Dobbertin 1992). Ce paradigme définit la croissance comme résultant du produit entre la croissance potentielle d'un arbre libre de compétition et un réducteur de croissance dépendant de la compétition. La compétition est mesurée ici à l'aide d'un indice de compétition dépendant des distances, le gradient de hauteur (modifié de Tomé et Burkhardt 1989):

$$[2] \quad \nabla_H = \sum_n \left[\frac{H_n - H_s}{d_{n.s} + 1} \right]$$

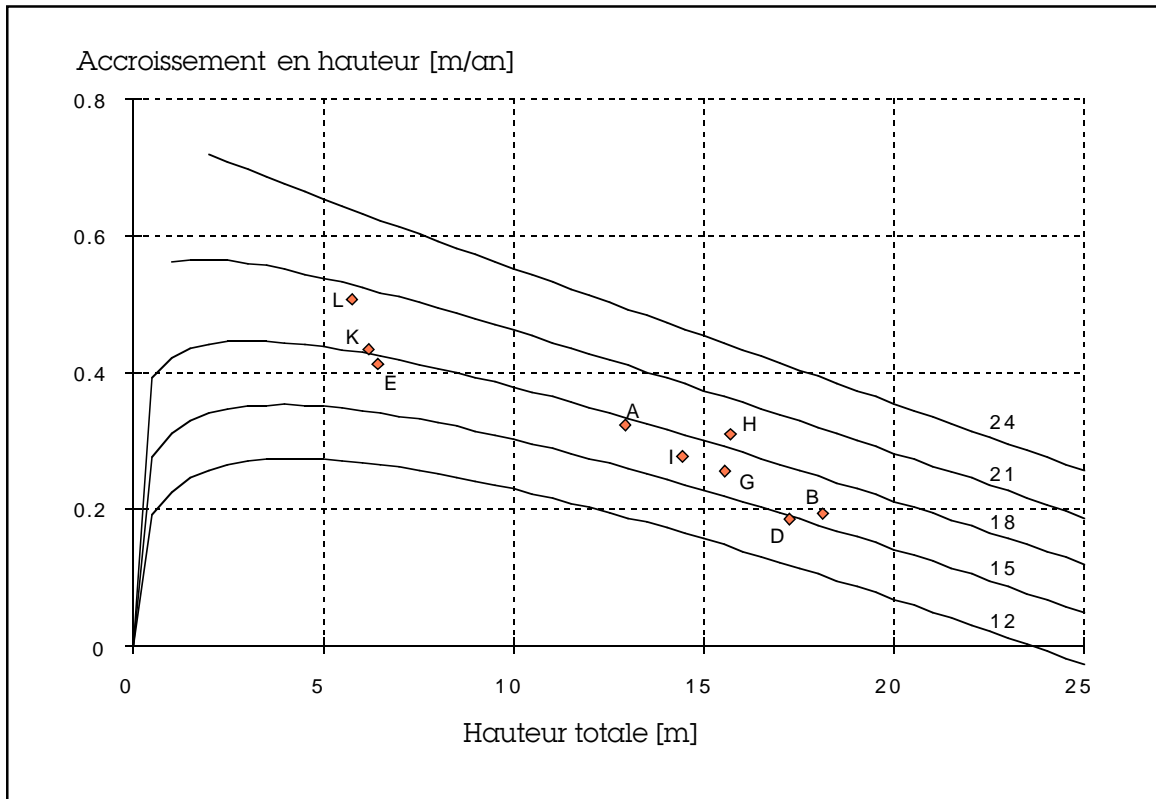
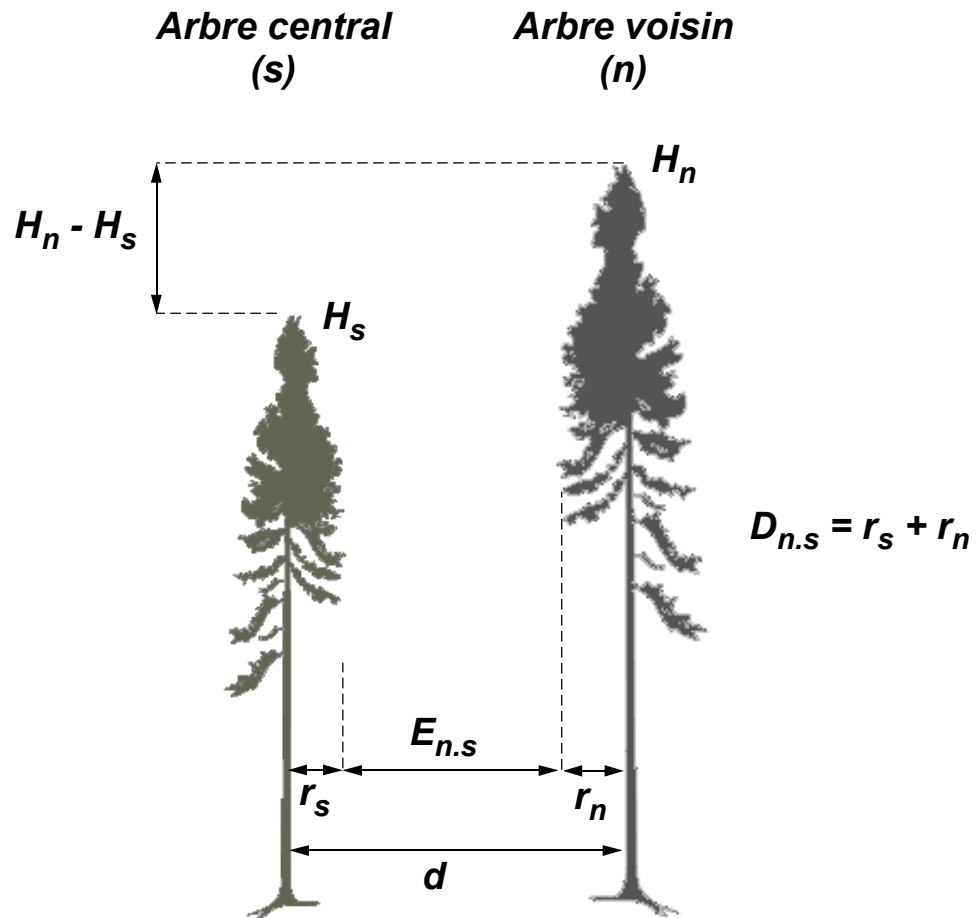


Figure 5: Productivité des 9 placettes complémentaires mesurées en 1994, déterminée à partir de l'éq. 1.



$$0.65 \frac{H_n - H_s}{D_{n,s}} + \left[0.5 - \frac{E_{n,s}}{D_{n,s}} \right] > 0$$

Fig. 6: Protocole de sélection des compétiteurs (Schütz 1989)

H_n et H_s sont respectivement les hauteurs d'un arbre voisin et d'un arbre central (1). Le protocole de sélection des arbres voisins en compétition utilisé est celui de Schütz (1989) (figure 6). L'accroissement en hauteur a été modélisée par:

$$[3] \quad i_h = \frac{a i_{h.pot}}{1 + \exp(b \nabla H)}$$

où a et b sont des paramètres à estimer par les moindres carrés non linéaires. Cette équation du type logistique a deux asymptotes horizontales, l'une tendant vers la valeur du numérateur de l'équation (quand $\nabla H \rightarrow -\infty$) et l'autre tendant vers 0 (quand $\nabla H \rightarrow +\infty$). La figure 7 montre l'absence de biais de l'éq 3. La figure 8 présente le comportement de l'équation 3 pour un IQS de 18 m à 50 ans, en fonction de la hauteur totale de l'arbre (qui détermine l'accroissement potentiel en hauteur) et le gradient de hauteur. Le coefficient de détermination ajusté (R^2) vaut 0.791, l'écart-type résiduel (ECR), 0.053 m/an et le nombre d'observations utilisées (n), 73.

Les entrées principales du sous-module de la croissance en hauteur sont donc la position cartographique des arbres, la hauteur totale de l'arbre central et de ses voisins ainsi que l'IQS. Au cycle t du modèle, la hauteur totale d'un arbre est donc actualisé par:

$$[4] \quad H(t) = H(t-1) + i_h(t)$$

c. Arbres "parois"

Dans une placette à surface fixe ou un dispositif expérimental, il n'est pas possible de déterminer l'ensemble des arbres voisins qui influencent la croissance des arbres situés au bord (à la parois) de la placette ou du dispositif. Un indice de compétition indépendant des distances tel que la hauteur relative (rapport hauteur totale sur la hauteur dominante) est utilisée pour estimer le gradient de hauteur ($R^2=0.854$, ECR=1.545, $n=68$):

(1) Lorsqu'un indice de compétition dépendant des distances est utilisé, l'arbre dont on souhaite déterminer la valeur de cet indice est appelé "arbre central". Les arbres qui l'entourent et qui sont pris en compte pour le calcul de l'indice sont nommés "arbres voisins".

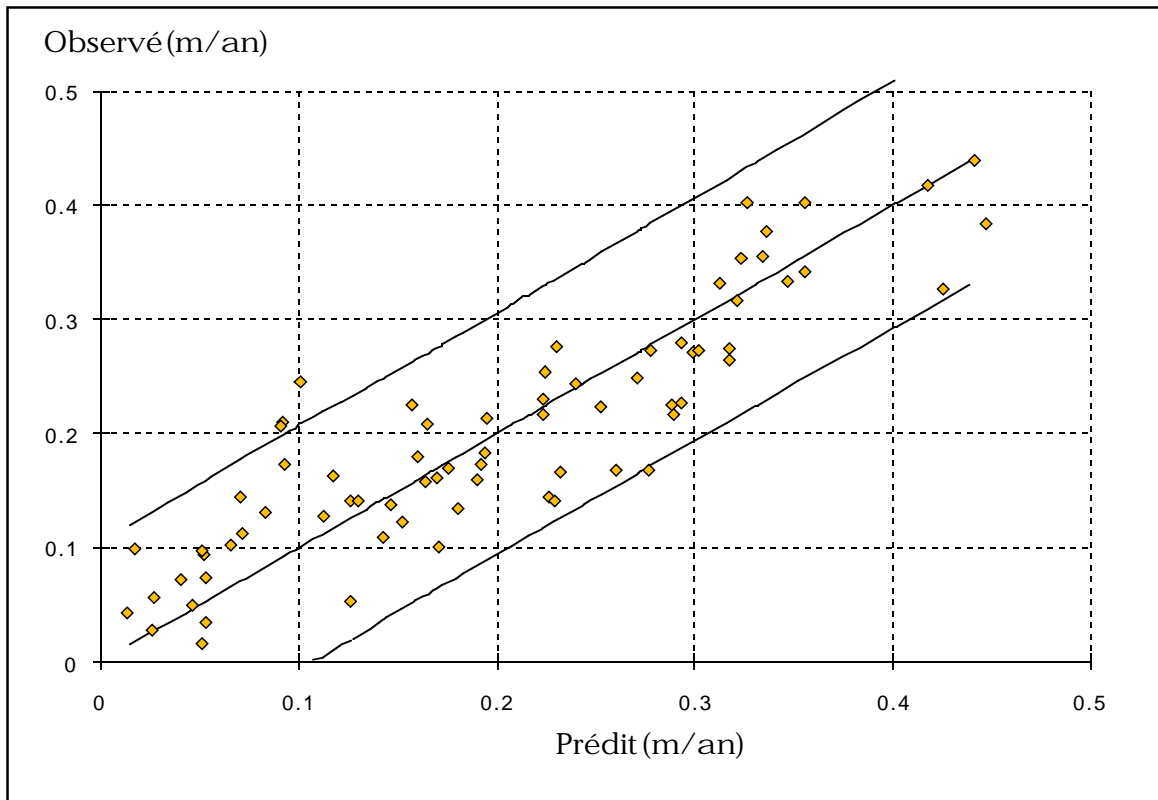


Figure 7: Accroissements en hauteur prédits et observés (éq. 3). Intervalle de confiance à 95% pour les valeurs individuelles

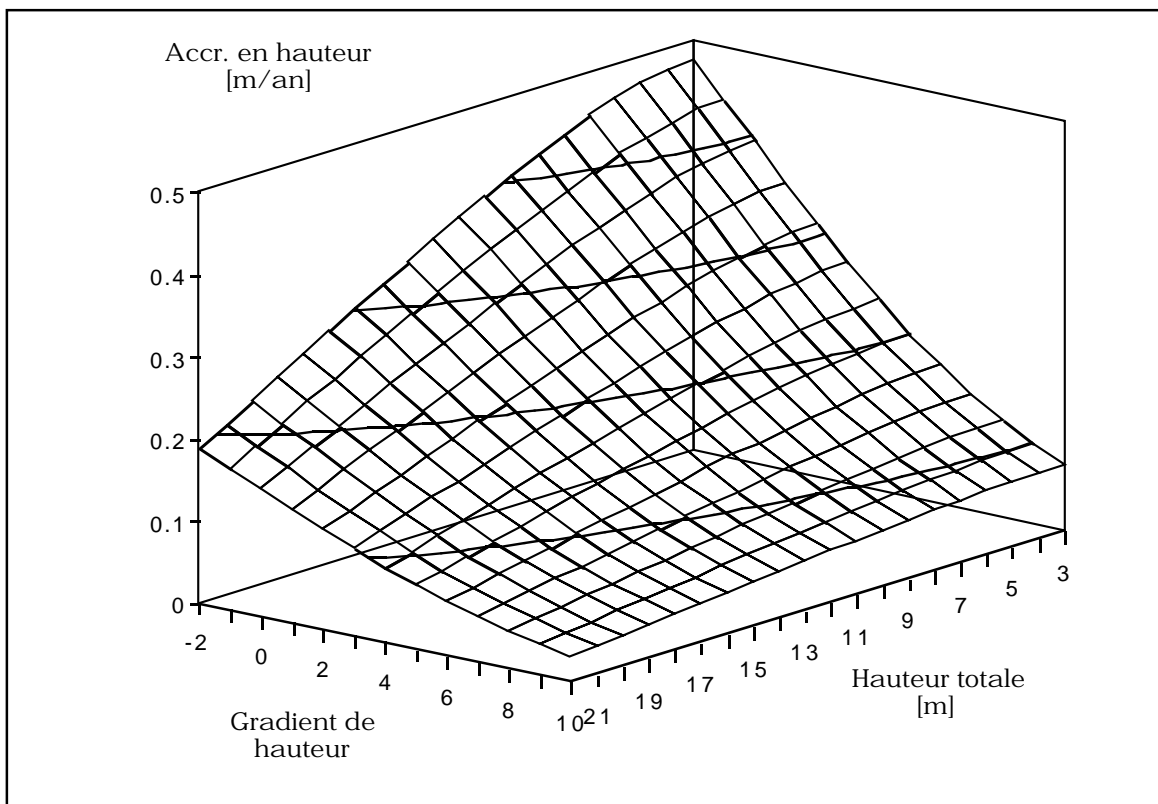


Figure 8: Prédiction de l'accroissement en hauteur en fonction de la hauteur totale et du gradient en hauteur (éqs. 1 et 3, IQS de 18 mètres à 50 ans).

$$[5] \quad \nabla H = -\nabla H_{\max} \left(1 - a \exp \left(1 - \frac{H}{H_{\text{dom}}} \right) \right)$$

∇H_{\max} et a sont estimés par les moindres carrés non-linéaires. La hauteur dominante correspond ici à la hauteur moyenne des 100 plus hauts arbres à l'hectare.

2.4. Croissance en volume

a. *Généralités*

La production totale en matière sèche produite annuellement dépendra de la surface foliaire de l'arbre et de l'énergie qu'il a su capter (figure 9).

$$[6] \quad i_v = \lambda_t \lambda_a \varepsilon LA I_h$$

Les hypothèses suivantes ont été émises:

- **Existence d'une relation linéaire entre λ_a et l'IQS**: Le coefficient d'allocation de la production totale en biomasse entre la partie aérienne et racinaire λ_a dépend de la fertilité stationnelle et ne varie pas en fonction de la compétition (Kaipiainen et Hari 1985, Ingestad et Ågren 1981). Il s'agit d'une première approximation.
- **Existence d'une relation logistique entre le produit $\lambda_t \varepsilon I_h$ et ∇H** : Le taux d'assimilation apparent ε dépend de l'intensité lumineuse moyenne reçue par l'arbre, d'une façon similaire à celle décrite par la loi de "dépendance physiologique" de Mitscherlich (e.g. Assman 1970, Kellomäki *et al.* 1979, Thornley et Johnson 1990). Quoique la relation allométrique existant entre d'une part la biomasse aérienne totale et d'autre part des variables telles la hauteur totale et la surface terrière reste relativement constante sur de grandes étendues (e.g. Ouellet 1983), le coefficient d'allocation de la production aérienne à la tige dépend avant tout de la position sociale de l'arbre dans le peuplement et ses habitudes de fourchaison (Bickelhaupt *et al.* 1979). Finalement, la quantité d'énergie I_h qu'un arbre peut capter annuellement dépend de sa position sociale dans le peuplement, que nous avons assimilé ici au gradient de hauteur.
- **Existence d'une relation allométrique entre la surface foliaire et les paramètres du houppier**: Dans un couvert forestier, le houppier d'un arbre peut se diviser en un

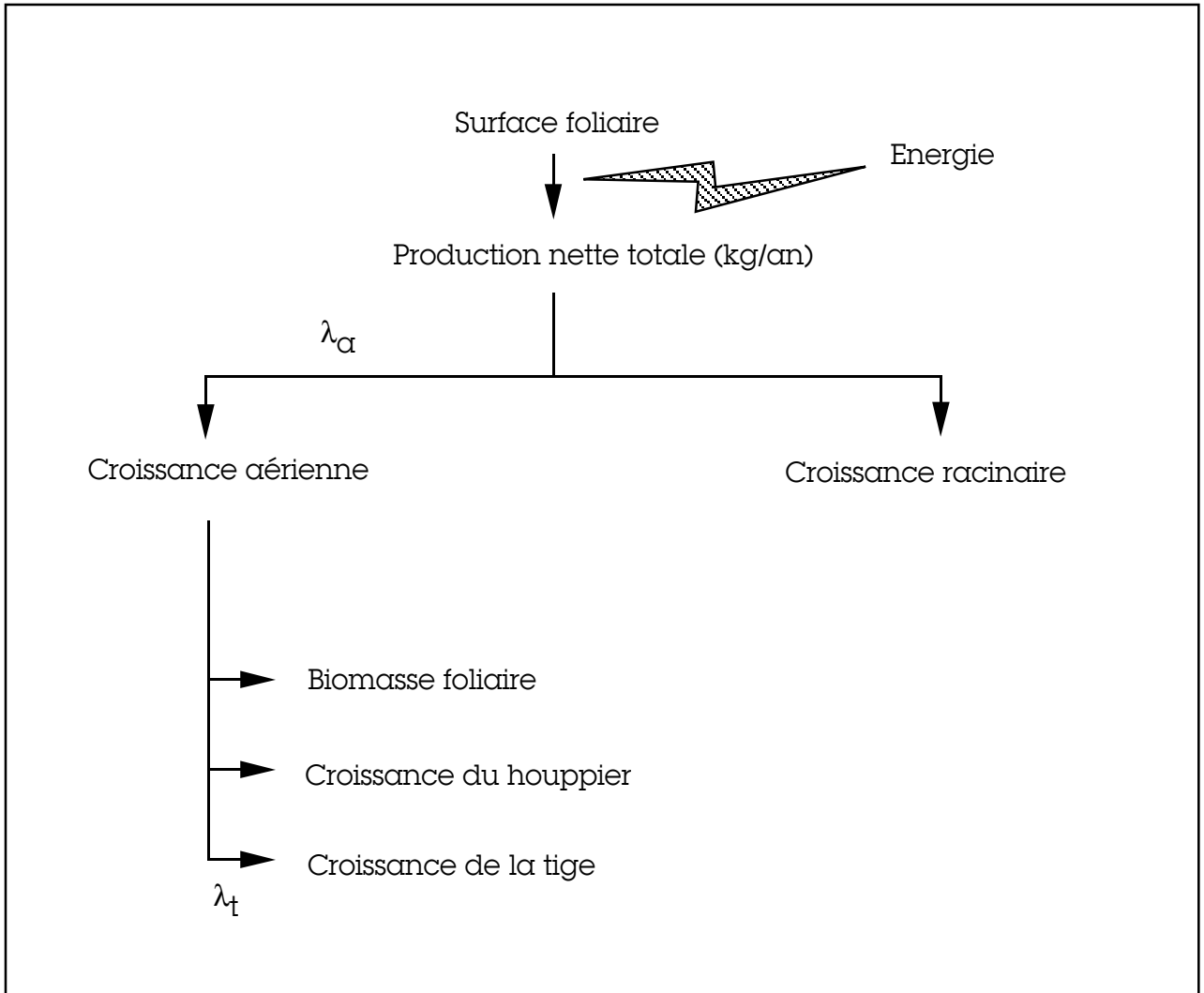


Figure 9: Allocation de la production annuelle totale en biomasse sèche.

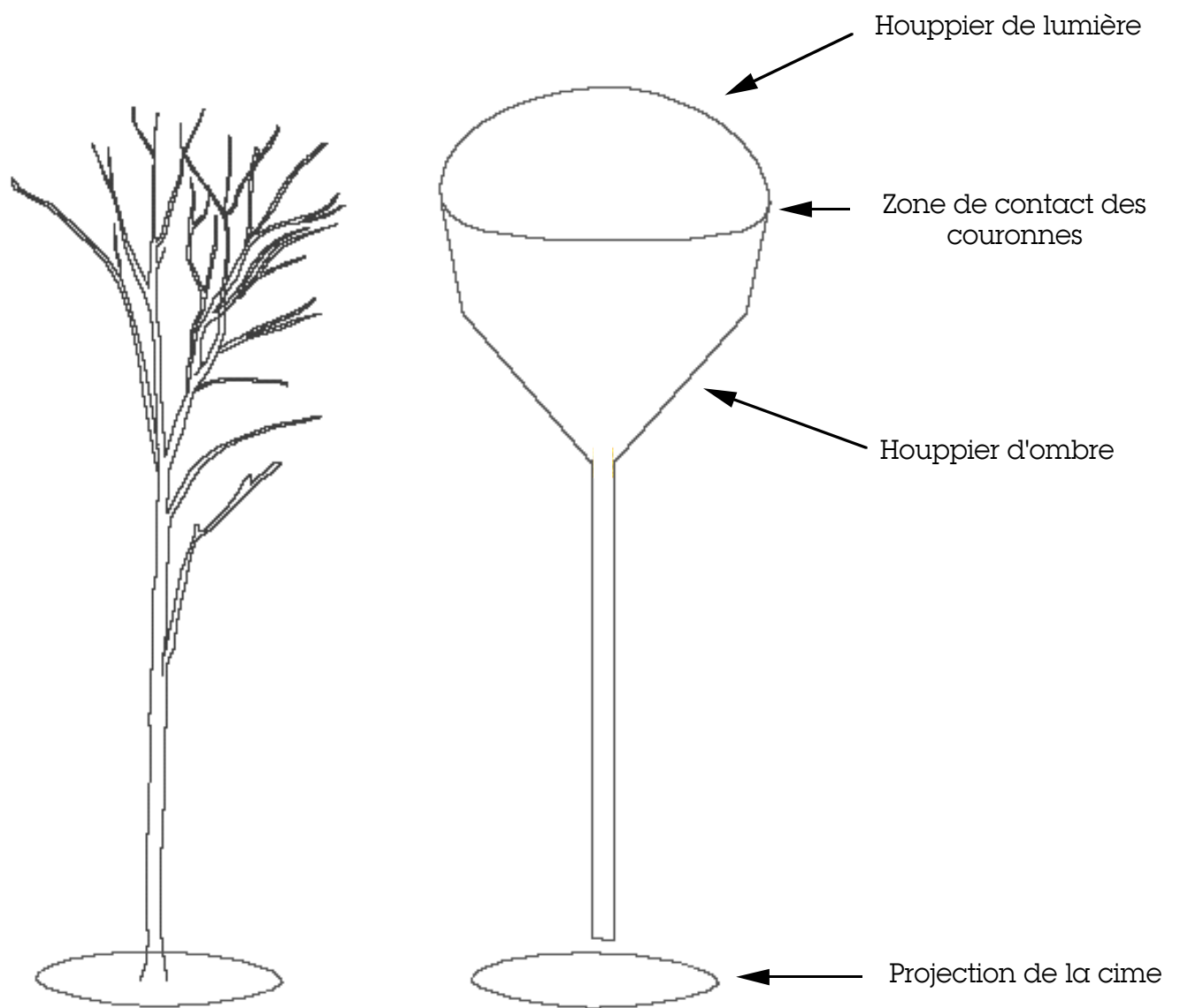


Figure 10: Distinction des types de houppier.

houppier de lumière et un houppier d'ombre (Burger 1939, Assman 1970, figure 10). Ces deux parties sont séparées par la zone supérieure du contact des couronnes. A ce niveau, de plus, le rayon du houppier y est maximum. Le houppier de lumière peut se considérer comme étant la partie fonctionnelle du houppier ou celle qui contribue le plus à l'accroissement annuel en volume. La surface externe du houppier de lumière est directement reliée à la surface foliaire de l'arbre par la dimension fractale du houppier (Zeide et Pfeifer 1990, Zeide et Gresham 1991):

$$[7] \quad LA = S_{h1}^{D/2}$$

La dimension fractale du houppier dépend à la fois de la distribution du feuillage dans la couronne, de la tolérance à l'ombrage de l'espèce et de la compétition que subit l'arbre. Dans la présente version du modèle, nous avons considéré en première approximation que la dimension fractale reste constante. En troisième lieu, le taux d'assimilation apparent dépend de la masse de l'arbre (et donc de son volume). Pour une même surface foliaire, ce taux sera d'autant plus faible que la masse de l'arbre sera grande, si s'accepte l'hypothèse que la respiration est directement proportionnelle à la masse de l'arbre (e.g. modèle de croissance de Von Bertalanffy - Pienaar et Turnbull 1973). En assimilant la surface externe du houppier de lumière à la surface de révolution autour de l'axe vertical du profil du houppier de lumière, il est possible d'établir que:

$$[8] \quad S_{h1} = k_{h1} R h_{h1}$$

où k_{h1} est une constante caractéristique de l'espèce. L'équation 6 est valable si le profil du houppier est confondu à une fonction de puissance entre R et h_{h1} .

b. Modèle de croissance en volume

Les hypothèses précédentes mènent au modèle simplifié suivant pour la croissance en volume de la tige (sous écorce, en dm^3/an):

$$[9] \quad i_v = f(\lambda_t \varepsilon I, \lambda_a, LA) = f(\nabla H, IQS, S_{h1}) = \frac{a \text{ IQS } S_{h1}^{D/2}}{1 + \exp(b \nabla H)}$$

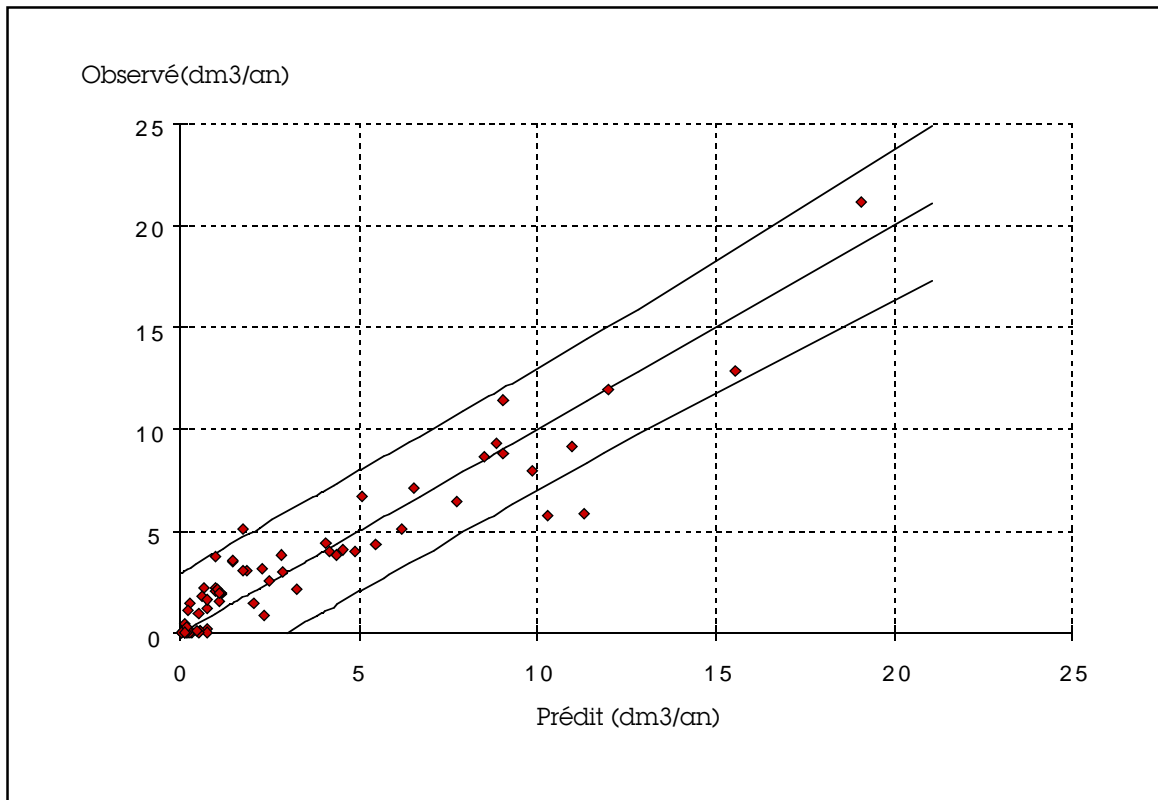


Figure 11: Accroissements en volume prédits et observés (éq. 9). Intervalle de confiance à 95% pour les valeurs individuelles

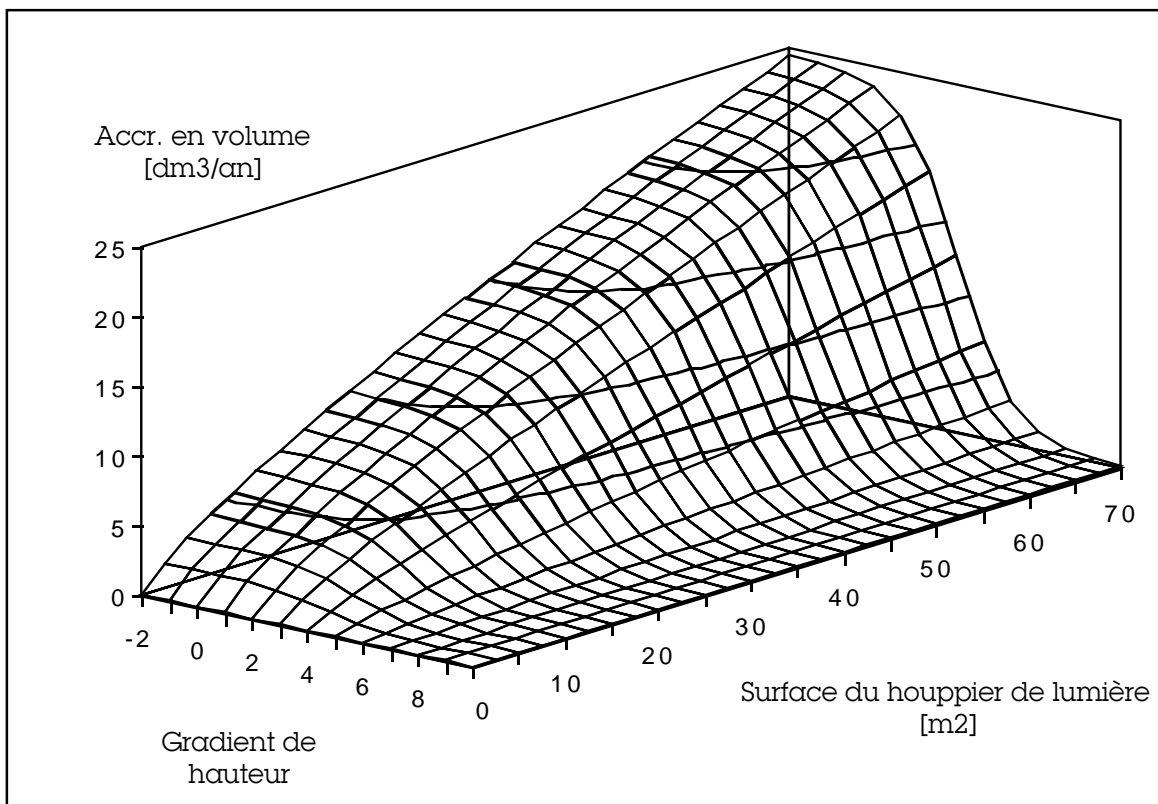


Figure 12: Prédiction de l'accroissement en volume en fonction de la surface du houppier de lumière et du gradient en hauteur (éq. 9, IQS de 18 mètres à 50 ans).

où a , b et D sont des paramètres estimés par les moindres carrés non linéaires ($R^2 = 0.841$, $ECR = 0.566 \text{ dm}^3/\text{an}$, $n=68$, figures 11 et 12). L'équation 9 possède deux asymptotes horizontales, l'une à 0 (quand $\nabla H \rightarrow +\infty$) et l'autre égale au numérateur de l'équation (quand $\nabla H \rightarrow -\infty$). Une transformation logarithmique a été appliquée à l'équation 9 pour stabiliser l'hétérogénéité de la variance résiduelle.

Les entrées principales du sous-module d'accroissement en volume sont donc la cartographie des arbres, la hauteur de l'arbre central et de ses voisins, le rayon de la cime, la longueur du houppier de lumière et l'IQS. Le volume sous écorce est donc actualisé au cycle t d'une simulation par:

$$[10] \quad v(t) = v(t-1) + i_v(t)$$

c. Equation de cubage

Le tarif de cubage couramment utilisé pour calculer le volume d'un érable à sucre (Perron 1983) fournit le volume du tronc et des branches sous écorce jusqu'à un diamètre d'utilisation de 9 cm avec écorce. En conséquence, un nouveau tarif a été établi pour fournir le volume sous écorce de la tige principale jusqu'au fin bout, afin d'estimer le volume sous écorce de la tige (dm^3) au début d'une simulation:

$$[11] \quad v = a(gH)^b$$

a et b sont deux paramètres estimés par les moindres carrés ($R^2 = 0.991$, $ECT = 12.5 \text{ dm}^3$, $n=107$, valeur minimale de 0.37 dm^3 et maximale de 958 dm^3). Ces observations proviennent des analyses de tige des 9 placettes complémentaires ainsi que celles effectuées par le Service canadien des forêts en 1984 lors d'une éclaircie dans le dispositif expérimental de Lejeune (figure 2). Une transformation logarithmique a été appliquée pour stabiliser l'hétérogénéité de la variance résiduelle.

d. Surface terrière et accroissement en surface terrière

Pour permettre une validation du modèle de croissance avec des données directement disponibles (dispositifs expérimentaux, placettes permanentes du MRN), il faut convertir l'accroissement en volume en accroissement en surface terrière. En premier lieu, cependant, la surface terrière sous écorce s'estime à l'aide du modèle suivant:

$$[12] \quad g = a + \frac{\pi b}{400} \text{dhp}^2$$

a et b sont deux paramètres estimés par les moindres rectangles, afin de pouvoir recalculer le dhp à partir de la surface terrière sous écorce avec l'aide de l'éq. 12 (R^2 partiel = 0.952, ECR = 0.214 dm², n=103). L'accroissement en surface terrière est déduit de l'accroissement en volume de la tige, à l'aide de la dérivée première du tarif de cubage par rapport au temps (éq. 11):

$$[13] \quad i_g = \frac{\frac{i_v}{ab(gH)^{b-1}} - g i_h}{H}$$

Au cycle t de la simulation, la surface terrière d'un arbre s'actualisera donc par:

$$[14] \quad g(t) = g(t-1) + i_g(t)$$

2.5. Branchaison

a. *Branchaison du houppier de lumière*

La charpente du houppier est caractérisée avant tout par les branches du second ordre de ramification, c'est-à-dire celles issues de l'axe principal de l'arbre. Chez les espèces à ramification sympodiale comme l'érabler à sucre, le houppier développe un ou plusieurs axes principaux selon la phase architecturale où se situe l'arbre (plans d'organisation hiérarchique et polyarchique, Edelin 1991). Néanmoins, il est toujours possible de considérer comme étant dominant, l'axe principal dont la partie distale représente le point le plus élevé de l'arbre et comme secondaires, les autres axes. L'élongation annuelle de cet axe dominant équivaut d'ailleurs à la croissance en hauteur de l'arbre. Alors que la formation des branches est contrôlée par la dominance apicale (phénomène d'inhibition corrélative), leur croissance subséquente dépend du contrôle apical, c'est-à-dire de l'effet inhibiteur de la compétition entre les branches du houppier (Leakey 1985). Pour exprimer quantitativement le phénomène du contrôle apical, Mitchell (1969, 1975), Inose (1982), Cluzeau *et al.* (1994) et Deleuze et Houiller (1995) ont utilisé la distance qui sépare l'apex de l'arbre à la base d'insertion d'une branche, ce que nous ferons

également. Puisque l'axe dominant se situe dans les meilleures conditions de croissance par rapport aux autres axes du houppier (les branches secondaires), son élongation annuelle représente leur potentiel d'élongation. Il est ainsi possible de relier la dynamique de croissance des branches du houppier de lumière à la croissance en hauteur par deux relations, l'une dynamique et l'autre statique:

$$[15] \quad \dot{l}_b = i_h l_b \left(\frac{\beta}{h} + \gamma \right)$$

$$[16] \quad l_b = \alpha h^\beta e^{\gamma H_t}$$

Les paramètres α , β et γ des deux équations sont estimés simultanément par régression 3SLS. L'éq. 16 résulte de l'intégration en fonction du temps de l'éq. 15. Une transformation racine carrée a été appliquée à l'éq. 16 pour stabiliser l'hétérogénéité de la variance résiduelle. Pour l'éq. 15, le coefficient de détermination ajusté et l'écart-type résiduel valent respectivement 0.709 et 0.198 m (figure 13). Quant à l'éq. 16, les mêmes indicateurs valent 0.726 et 0.214 [m] (figure 14). Pour chaque équation, le nombre d'observations est de 263 branches.

b. Paramètres morphométriques du houppier de lumière

La zone supérieure de contact des cimes correspond à la partie distale de branches dont la projection horizontale au sol est égale au rayon du houppier (figure 15). La caractérisation de ces branches, qui sont les premières en partant du sol à appartenir au houppier de lumière, permet de déterminer la dynamique de croissance du rayon du houppier. La hauteur à laquelle se situe cette zone de contact est normalement irrégulière autour de la couronne d'un arbre et dépend des caractéristiques respectives des arbres qui l'entourent. Dans la version actuelle du modèle de croissance, ce sont les caractéristiques moyennes de ces branches qui sont analysées. Pour estimer leur longueur et leur élongation à l'aide des éqs. 15 et 16 et pour un rayon de cime donné, il est nécessaire de connaître la distance entre l'apex de l'arbre et leur base d'insertion:

$$[17] \quad h_{b.h1} = \frac{aR^b}{1 + \exp(c \nabla H)}$$

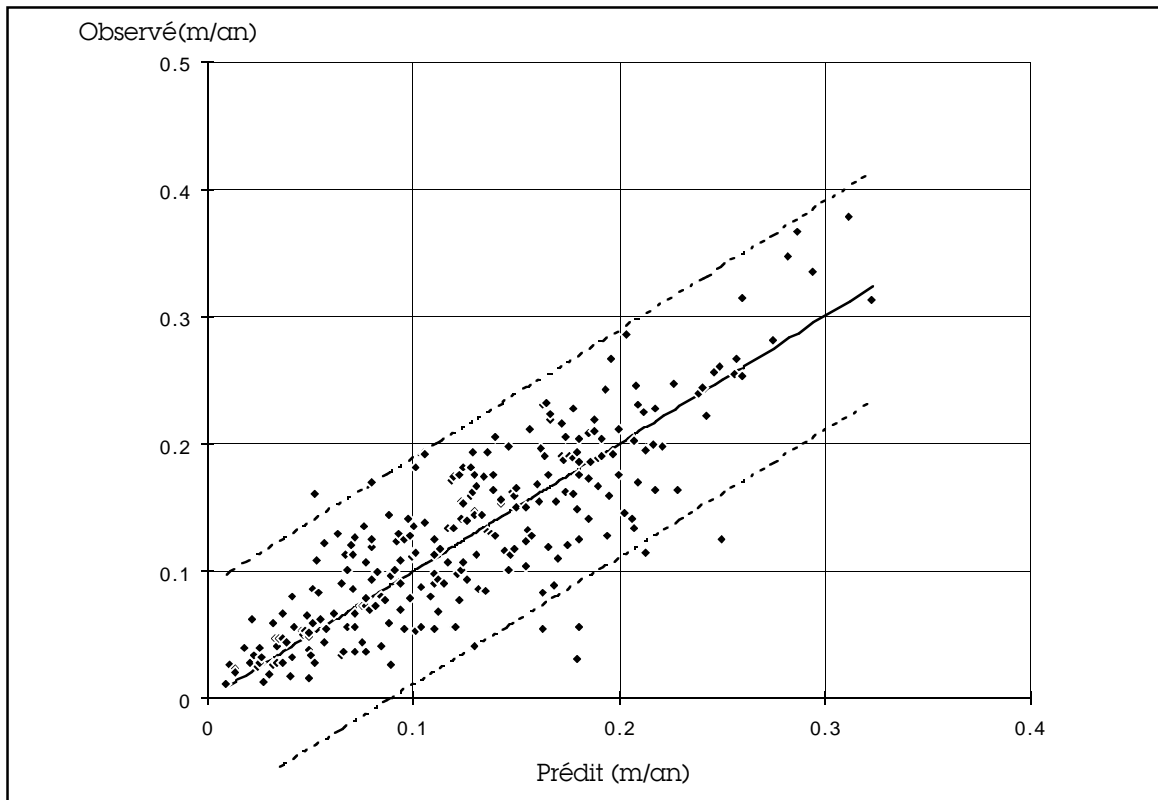


Figure 13: Branches du houppier de lumière: élongations annuelles prédites et observées (éq. 15). Intervalle de confiance à 95% pour les valeurs individuelles

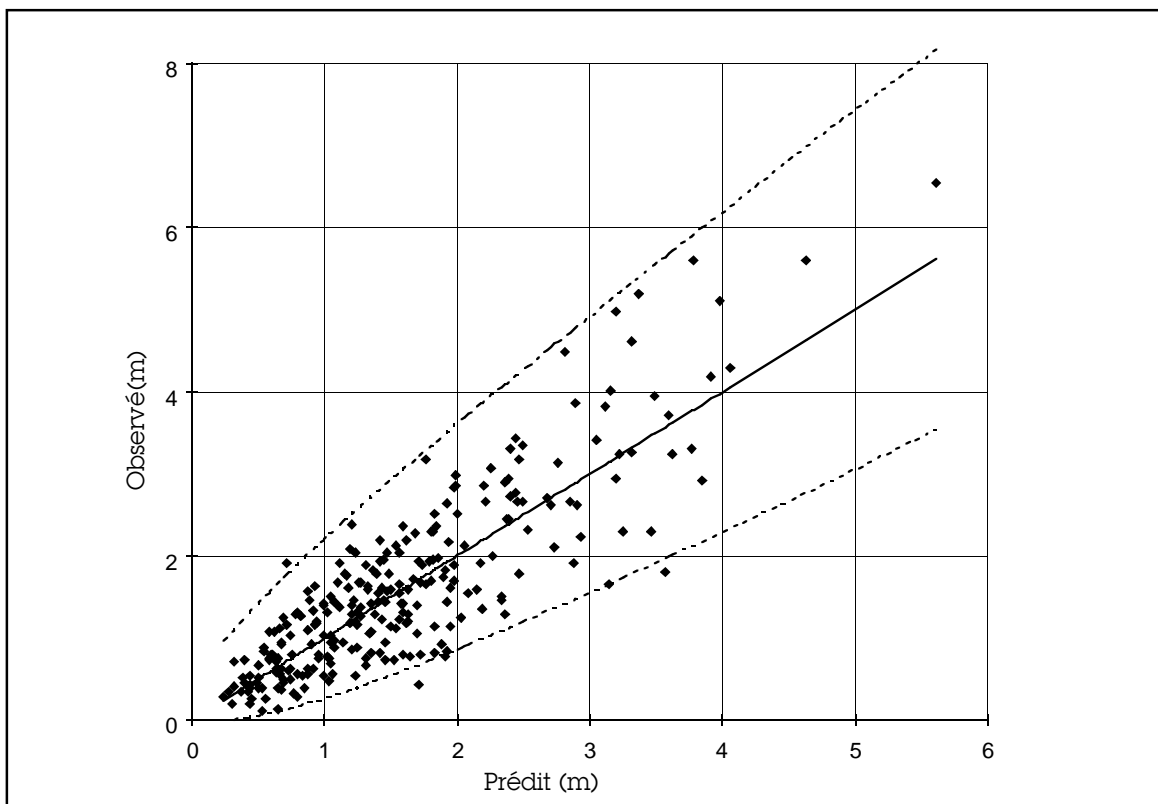


Figure 14: Branches du houppier de lumière: longueurs totales prédites et observées (éq. 16). Intervalle de confiance à 95% pour les valeurs individuelles.

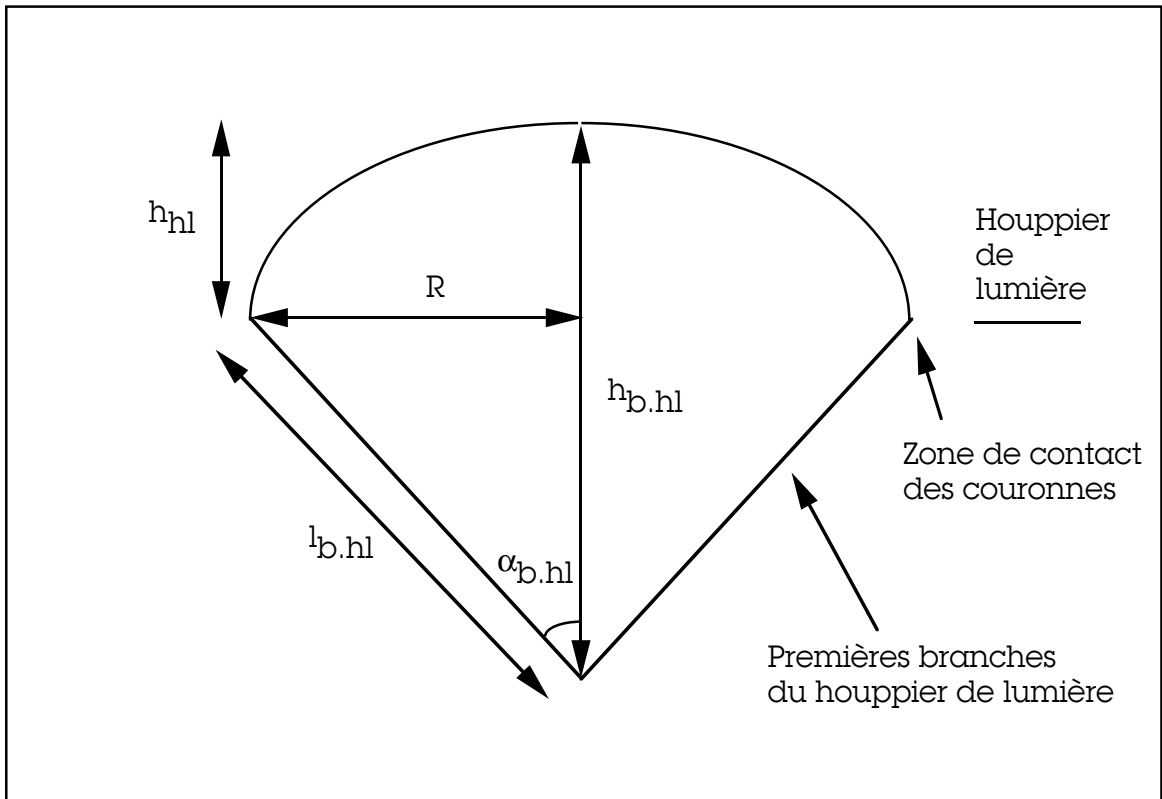


Figure 15: Paramètres du houppier de lumière

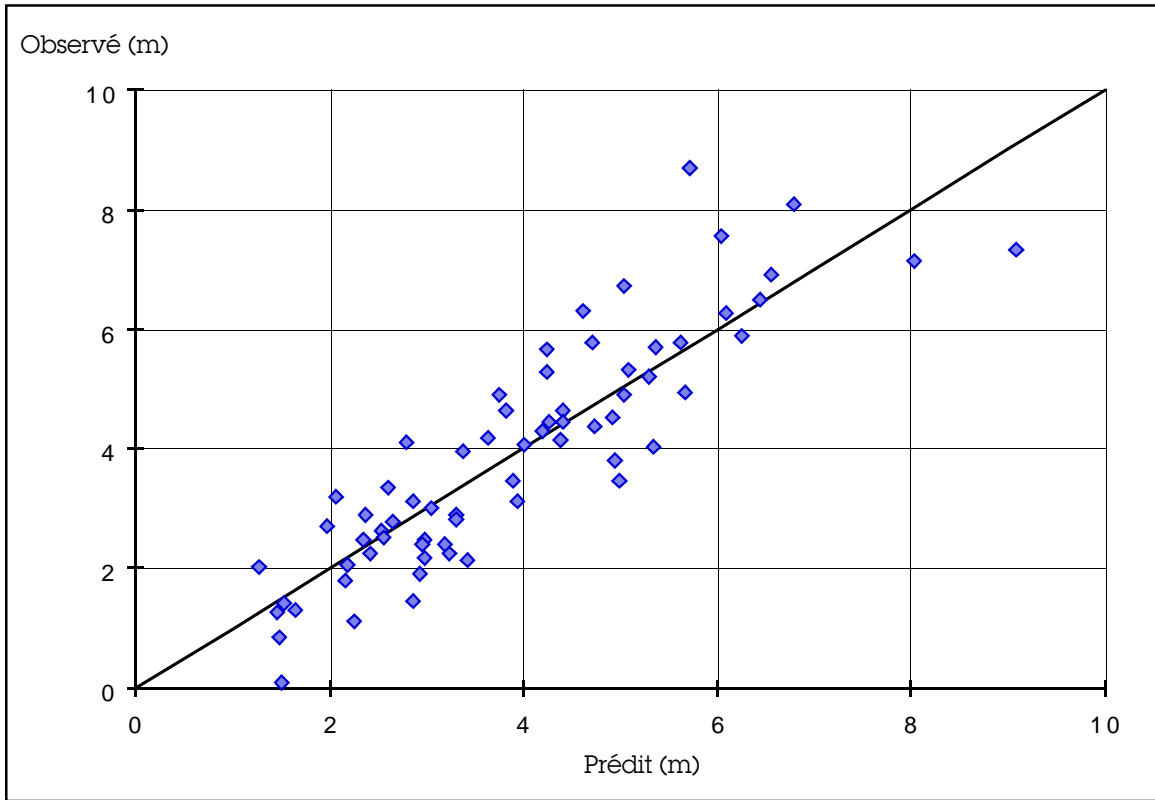


Figure 16: Prédiction de la distance entre l'apex de l'arbre et la base d'insertion des branches définissant la base du houppier de lumière (éq. 17).

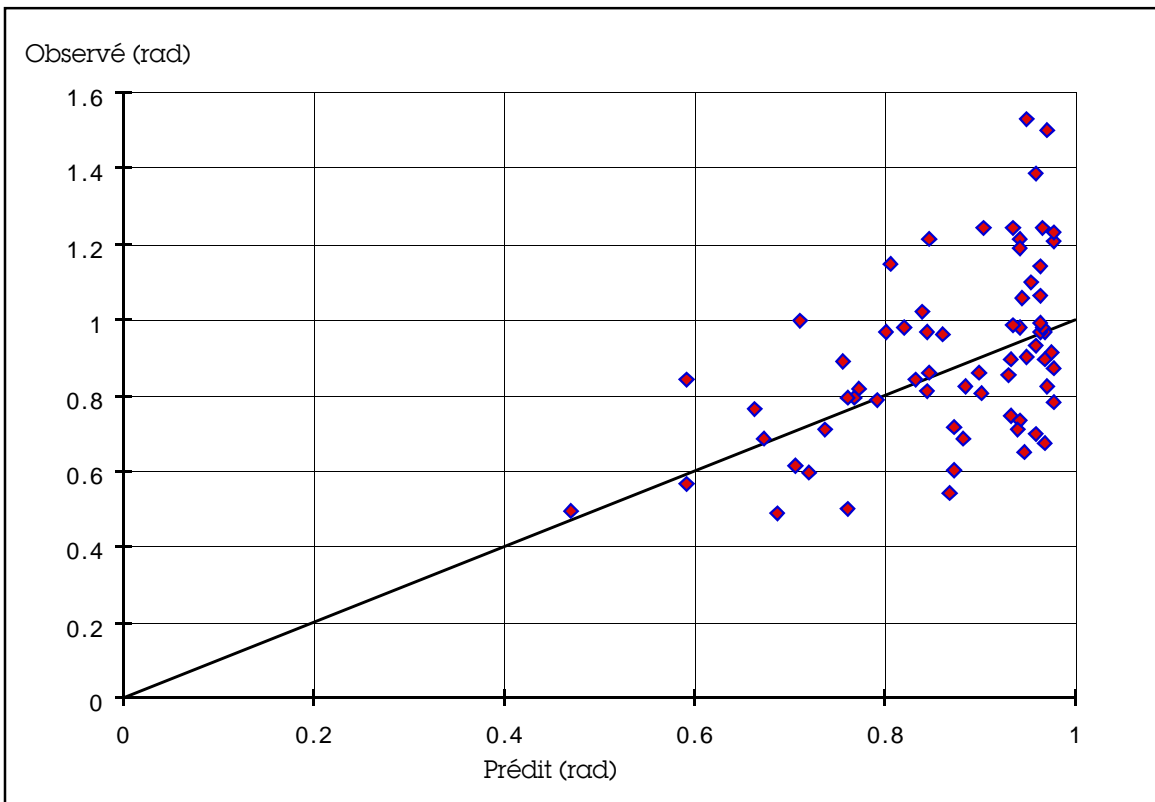


Figure 17: Prédiction de l'angle moyen d'insertion des branches définissant la base du houppier de lumière (éq. 19).

a, b et c sont estimés par régression non linéaire ($R^2 = 0.779$, ECR = 0.913 m, n = 68, figure 16). L'éq. 17 est uniquement valable pour les arbres situés dans des peuplements pleins non éclaircis, où par l'effet du contact entre les couronnes, la compétition provoque naturellement la remontée de la cime. L'éq. 17 fournit ainsi pour un rayon de cime donné, la plus petite distance entre l'apex de l'arbre et la base d'insertion de la première branche du houppier de lumière. La valeur initiale de $h_{b,hl}$ sera donc correctement estimée si le peuplement n'a pas été éclairci avant le début de la simulation. Si ce n'est pas le cas, il faudra la mesurer ou utiliser une autre équation. Au cycle t de la simulation, cette variable est actualisée par l'équation suivante, qui découle des considérations précédentes:

$$[18] \quad h_{b,hl}(t) = \max \left[h_{b,hl}(t-1), \frac{a R(t)^b}{1 + \exp(c \nabla H(t))} \right]$$

La longueur moyenne $l_{b,hl}$ ainsi que son élongation $i_{b,hl}$ sont calculées à l'aide des éqs. 15 et 16. L'angle moyen d'insertion, quant à lui, est estimé par:

$$[19] \quad \alpha_{b,hl} = A \sin \left[\alpha_{\min} + \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{1 + \exp(c \ln(l_{b,hl}) - b)} \right]$$

α_{\min} , α_{\max} , b et c sont estimés par régression non linéaire ($R^2 = 0.311$, ECR = 0.115 rad, n = 68, figure 17). Les éqs. 15 à 19 permettent ainsi de calculer la croissance annuelle du rayon du houppier:

$$[20] \quad i_r(t) = \sin(\alpha_{b,hl}) i_{b,hl}(t)$$

$$[21] \quad R(t) = R(t-1) + i_r(t)$$

La distance entre l'apex de l'arbre et la base du houppier de lumière se calculera comme :

$$[22] \quad h_{hl} = h_{b,hl} - \cos(\alpha_{b,hl}) l_{b,hl}$$

Dans la présente version du modèle de croissance, la branchaison est ainsi caractérisée par les dimensions moyennes des branches définissant la base du houppier de lumière. Puisque leur apex est situé au niveau du rayon du houppier, elles sont également les plus longues et les plus grosses, fourches exclues. Leurs caractéristiques serviront donc dans une prochaine version à spécifier la distribution des diamètres des branches le long du tronc (e.g. Colin et Houllier 1992, Maguire *et al.* 1994).

3. Logiciel de croissance DendroSim

Pour permettre un usage aisé du modèle de croissance qui vient d'être présenté aux paragraphes précédents, un utilisateur doit disposer d'outils adéquats. Un logiciel de croissance en fait bien évidemment partie.

Deux types de logiciels au moins sont connus par un utilisateur régulier de l'informatique: le programme de traitement de texte et le chiffrier électronique. L'interface du logiciel de croissance (DendroSim β 0.2) a donc été programmée en VisualBasic sous forme de macro complémentaire de Microsoft Excel 5.0. Cette démarche offre l'avantage de profiter de la connaissance de ce logiciel par l'utilisateur et des capacités puissantes et conviviales d'Excel pour exploiter les résultats (graphiques et tableaux croisés). Elle permet également d'envisager une conversion facile entre les plateformes Macintosh et Windows (la version actuelle a été développée sur Macintosh). Les calculs sont réalisés en arrière-plan par un logiciel de traitement de base de données (Microsoft FoxPro 2.5, également accessible sur les deux plateformes).

DendroSim est un squelette de modèle de croissance. Un attrait important d'un logiciel de croissance consiste à offrir à l'utilisateur la capacité de modifier à sa guise toutes les équations (modèle de croissance d'arbre ou de peuplement, indices de compétition dépendant ou indépendant des distances, données à fournir, types d'espèces, tarifs de cubage, etc.). En conséquence, DendroSim assiste le concepteur dans l'élaboration de son modèle de croissance. Les équations et la forme du modèle de croissance font partie des données à fournir au programme pour pouvoir débiter une simulation. Seule la représentation de la connaissance (forme de stockage des données, interprétation des équations) et le mécanisme de la simulation y sont prédéterminés.

Il est important de spécifier l'échelle à laquelle se déroule une simulation. Certains logiciels de croissance fonctionnent sur des massifs forestiers, d'autres sur des strates forestières ou des peuplements, d'autres encore sur des placettes d'échantillonnage. Le présent logiciel travaille au niveau le plus petit, c'est-à-dire au niveau de la placette d'échantillonnage ou du dispositif expérimental. Une simulation prise en charge par DendroSim consiste donc à fournir la description de la situation initiale de la placette ou du dispositif ainsi que celle de l'ensemble des événements qui s'y dérouleront. Ces descriptions se font avec l'aide de listes d'arbres (figure 18). Actuellement, DendroSim ne dispose pas encore de la capacité nécessaire pour simuler la croissance d'un ensemble de placettes, afin d'actualiser un réseau d'inventaire par exemple.

3.1. Spécification du modèle de croissance

Un modèle de croissance représente une approximation schématique du fonctionnement dynamique de la forêt en vue de sa simulation et de sa compréhension. La structure fonctionnelle d'un modèle se décrit donc par un ensemble organisé et interdépendant d'éléments (variables) dont il faut caractériser le rôle. Le nombre de variables utilisées dans le modèle est limité à la quantité de mémoire vive disponible ainsi qu'à la capacité du disque dur de l'ordinateur

a. Types de variables à l'initialisation

La situation initiale de la placette est décrite sous la forme d'une liste d'arbres caractérisés par un certain nombre de variables (e.g. espèce, dhp, hauteur, etc.). Plusieurs types de variables sont distingués, car il ne sera possible pour l'utilisateur de toujours fournir toutes les variables nécessaires au bon fonctionnement du modèle de croissance (hauteur du houppier de lumière, par exemple). Il faut donc distinguer des autres variables les variables dont l'utilisateur doit obligatoirement fournir la valeur initiale:

- **Les variables obligatoires par défaut** sont celles que l'utilisateur doit absolument fournir lors de la description de la situation initiale de la placette. Par défaut, il s'agit du nom, du dhp et de l'espèce de tous les arbres de la placette. L'orthographe des espèces suit celle des abréviations fournies par le M.R.N. (e.g. Saucier 1994)
- **Les variables obligatoires**, quant à elles, sont exigées par le concepteur du modèle de croissance. Si le modèle utilise par exemple un indice de compétition dépendant des distances, il sera nécessaire de fournir les coordonnées cartographiques (x,y,z)

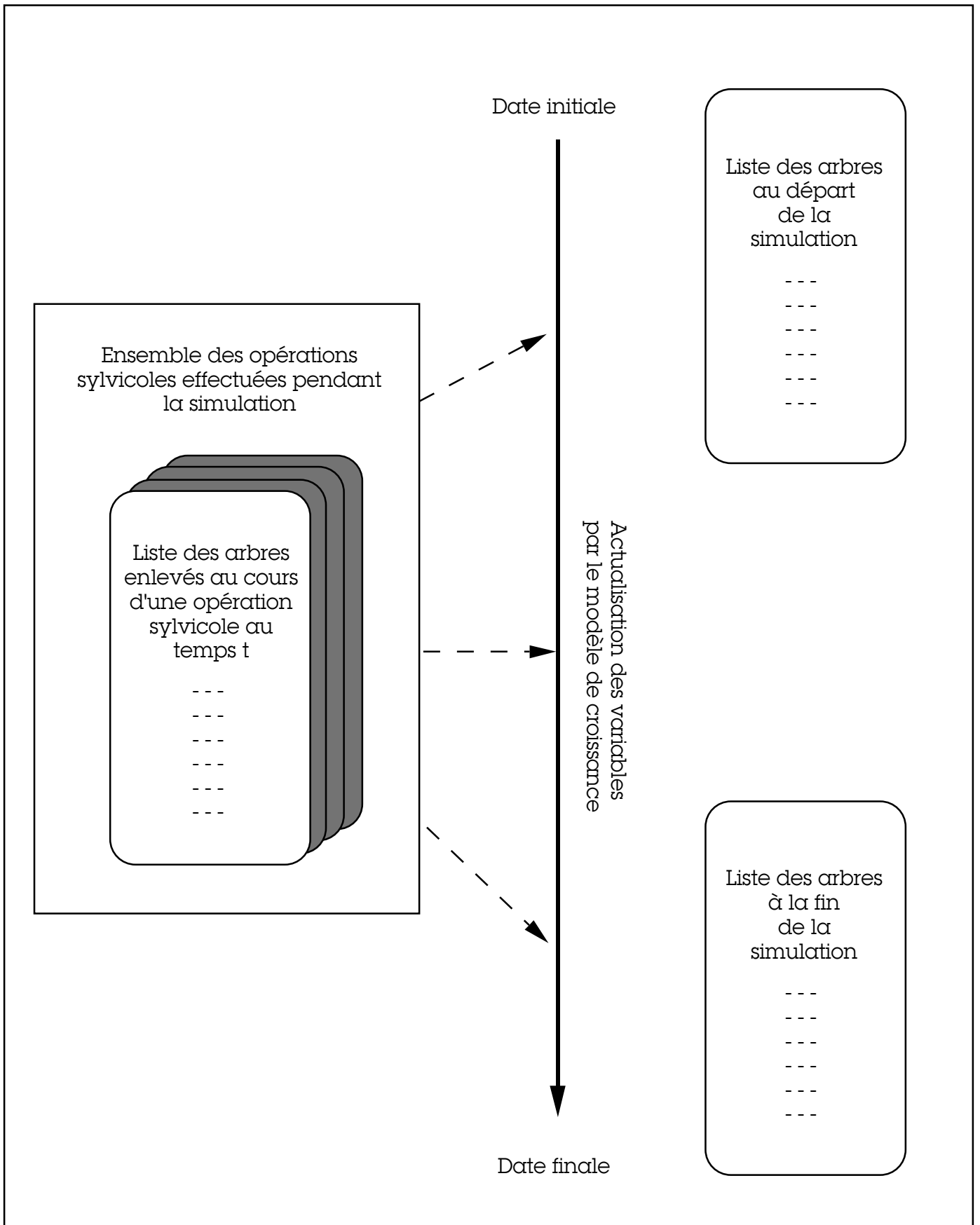


Figure 18: Principe du déroulement d'une simulation.

des arbres et les variables nécessaires au protocole de sélection des arbres voisins (hauteurs et rayons du houppier pour le protocole de Schütz).

- **Les variables dérivées** sont celles qui sont nécessaires au modèle à l'initialisation de la simulation mais qui ne sont pas fournies par l'utilisateur. Elles sont estimées avec l'aide d'équations à partir des variables obligatoires et d'autres variables dérivées (indice de compétition, surface terrière à partir du dhp, volume à partir de la hauteur et de la surface terrière, par exemple).
- **Les covariables** sont des variables fournies par DendroSim et qui peuvent être utilisées dans les équations du modèle de croissance. Celles-ci sont actuellement au nombre de sept: l'IQS (indice de qualité de station), la surface terrière à l'hectare (m²/ha), le nombre de tige à l'hectare, le volume à l'hectare (m³/ha), la hauteur et le diamètre dominants (des cent plus hautes tiges à l'hectare, respectivement en m et en cm) et le CCF (crown competition factor, Krajicek *et al.* 1969). Ces covariables de base permettent d'en déduire d'autres, tel le diamètre moyen quadratique à partir de la surface terrière et du nombre de tiges à l'hectare, ou encore le volume de l'arbre moyen de la placette.

b. Types de variables pendant la simulation

Certaines variables sont réinitialisées à chaque pas de la simulation, d'autres, par contre, sont actualisées:

- **Les réservoirs** sont des variables dont l'actualisation à chaque pas de la simulation dépend de leur valeur au pas précédent (ils se remplissent ou ils se vident). Il faut penser au volume ou à la hauteur par exemple.
- **Les vannes** représentent l'accroissement des réservoirs à chaque pas de la simulation, dont elles partagent le nom (le flux qui entre ou qui sort des réservoirs).
- **Les contrôles** sont des variables nécessaires pour calculer la valeur des vannes et qui sont recalculées à l'aide d'une équation. Elles sont réinitialisées à chaque pas de simulation.
- **Les covariables** ont déjà été décrites précédemment. Il s'agit en fait de contrôles calculés par DendroSim.
- **Les descripteurs** sont des constantes qui décrivent un arbre. Il s'agit de son nom et de l'espèce à laquelle il appartient.

Les trois premiers types de variables sont ceux utilisés par l'approche systémique (e.g. de Rosnay 1975). Il est ainsi possible de concevoir le modèle de

croissance sur Stella II (Richmond *et al.* 1990), d'y valider sa cohérence interne et d'y effectuer des analyses de sensibilité.

Les vannes et les contrôles sont automatiquement des variables dérivées. Seuls les réservoirs peuvent être obligatoires ou dérivés. De plus, seuls les réservoirs dérivés sont définis à l'aide de deux équations qui peuvent être différentes, l'une pour le calcul de la valeur initiale et l'autre pour son actualisation au cours de la simulation.

Un certain nombre de noms de variables sont réservés par DendroSim. Il s'agit de "nom" (nom de l'arbre), "espece" (espèce), "dhp" (diamètre à hauteur de poitrine), "g" (surface terrière de l'arbre), "v" (volume de l'arbre), "iqs" (IQS), "gha" (surface terrière à l'hectare), "nha" (nombre de tiges à l'hectare), "vha" (volume à l'hectare), "hdom" (hauteur dominante), "ddom" (diamètre dominant) et "ccf" (crown competition factor).

c. Ordre de calcul des variables

A chaque pas de la simulation, la valeur des différentes variables est calculée selon un ordre croissant. Les contrôles sont calculées avant les vannes, les vannes avant les réservoirs. Cet ordre de calcul revient d'ailleurs à considérer que le début de chaque pas de simulation se situe à la fin de la saison de croissance. Cependant, la valeur d'un contrôle peut être nécessaire au calcul d'un autre contrôle, etc. Il faut donc fournir un ordre de calcul. Cet ordre est celui déterminé pour l'initialisation de la simulation.

d. Forme des équations

Les équations peuvent se référer à toutes les fonctions communes proposées par FoxPro (exp(), log(), cos(), ^, mais aussi IIF(), ...). Une aide en ligne indique la liste des fonctions disponibles. Celle-ci fournit également les noms des variables qui peuvent être utilisées dans l'équation, sur base de l'ordre de calcul des variables. Lorsque certaines équations atteignent un degré de complexité qui empêche sa formation en une seule expression, celles-ci peuvent se définir dans une librairie de fonctions propre à chaque simulation (il faut alors savoir programmer en FoxPro). Il est possible de fournir une équation différente pour chaque espèce (e.g. équation hauteur-diamètre, tarif de cubage, courbe de productivité) ou de fournir une équation générale valable pour toutes les espèces, ou aussi une équation particulière pour quelques espèces et une équation générale pour toutes les autres.

e. Exemple

A titre d'exemple, le tableau suivant fournit toutes les variables utilisées par le modèle de croissance décrit au long du point 2 ainsi que leurs caractéristiques:

TABLEAU 2: Exemple de rôle de variables

Variable	Ordre	Initialisation			Simulation				
		Eq.	Oblig.	Dér.	Eq.	Réser	Vann	Contr	Descr
Espèce	-	-	•		-				•
Nom	-	-	•		-				•
x	-	-	•		-				•
y	-	-	•		-				•
z	-	-	•		-				•
dhp	-3	-	•		[12]	•			
H	-2	-	•		[4]	•			
R	-1	-	•		[20]	•			
g	0	[12]		•	[14]	•			
∇_H	1	[2, 5]		•	-			•	
v	1	[11]		•	[10]	•			
$h_{b,hl}$	2	[17]		•	[18]	•			
l_b	3	[16]		•	-			•	
$\alpha_{b,hl}$	4	[19]		•	-				
i_b	4	[15]		•	-			•	
h_{hl}	5	[22]		•	-			•	
i_h	5	[3]		•	-		•		
$i_{h,pot}$	5	[1]		•	-		•		
i_r	6	[20]		•	-		•		
S_{hl}	6	[8]		•	-			•	
i_v	7	[9]		•	-		•		
i_g	8	[13]		•	-		•		

Eq.: équation, **Oblig.**: obligatoire, **Dér.**: dérivée, **Réser.**: réservoir, **Contr.**: contrôle, **Descr.**: descripteur

3.2. Un scénario par classeur

Une fois que DendroSim est installé dans le dossier des Macros complémentaires d'Excel, l'utilisateur peut le charger comme n'importe quelle autre macro complémentaire. Lorsqu'il est chargé, DendroSim crée un classeur vide (nommé dorénavant classeur-scénario). Un classeur-scénario contient quatre feuilles de calcul visibles pour l'utilisateur. Celles-ci contiennent ou contiendront respectivement les données utilisées dans la simulation, une table de production de la placette au cours de la simulation, le détail des résultats (liste des arbres aux différents moments de la simulation) ainsi que les résultats exprimés sous forme de tableau. D'autres feuilles du classeur sont cachées de la vue de l'utilisateur, il s'agit avant tout des réglages initiaux et des équations du modèle de croissance (figure 19).

Lorsque DendroSim est chargé, la barre de menus d'Excel s'enrichit d'un menu supplémentaire, **DendroSim**. Celui-ci contient 4 éléments:

- **Aide**
- **Nouveau scénario**, pour créer un nouveau scénario à partir d'un modèle de classeur automatique particulier à DendroSim (pendant à Nouveau... du menu Fichier d'Excel).
- **Réglages...**, pour accéder au dialogue des réglages initiaux. Ce dialogue permet d'accéder à la mécanique du modèle de croissance du classeur-scénario actif à l'écran.
- **Tableaux...**, cette option n'est pas encore active, elle est destinée à fournir à l'utilisateur un certain nombre de tableaux standards pour présenter ses résultats.
- **Simule**, pour débiter une simulation du classeur-scénario actif à l'écran.

A l'exception de l'élément "Nouveau scénario", le menu de DendroSim s'active seulement lorsqu'une feuille de données d'un classeur-scénario est la fenêtre active à l'écran. Il est donc possible d'utiliser Excel comme de coutume, les fonctions complémentaires de DendroSim étant seulement accessibles à partir d'un classeur-scénario.

Classeur - Scénario

Feuilles de calcul

-
- Données
 - Situation initiale
 - Evènements
 - Scénario
-

-
- Table de production de la placette pendant la simulation
-

-
- Liste des résultats
-

-
- Résultats présentés sous forme de tableaux dynamique
-

-
- Réglages
 - dates de début et de fin de simulation,
 - - IQS,
 - surface de la placette
 - amplitude des classes de diamètres, etc.
-

-
- Modèle de croissance
 - types de variables
 - - équations
 - librairie de sous-routines FoxPro, etc.
-

..... caché de la vue de l'utilisateur

Figure 19: Eléments d'un classeur de DendroSim

3.3. Initialisations

a. Réglages initiaux

Un certain nombre de paramètres d'initialisation doivent être donnés pour caractériser le dispositif ou la placette dont la croissance est simulée. Il s'agit:

- **Nom du dispositif**
- **Type de drainage** (ce paramètre n'a pas encore mis à profit dans la version actuelle de DendroSim)
- **Indice de qualité de station**. Il s'agit d'une covariable de DendroSim. L'utilisation de ce paramètre dans un modèle de croissance n'a de sens que lorsque une seule espèce est présente dans le dispositif ou que l'on considère que les espèces présentes suivent la même courbe de productivité. Lorsque le concepteur d'un modèle de croissance désire faire varier l'IQS espèce par espèce, il faut la considérer comme un contrôle obligatoire.
- **Limites inférieures et supérieures du dispositif**. Il s'agit des coordonnées (x,y) des bornes inférieure droite et supérieure gauche. Dans sa version actuelle, la placette d'échantillonnage ou le dispositif expérimental doit avoir une superficie de forme carrée ou rectangulaire. Dans une prochaine version, la forme du dispositif ou de la placette pourra être circulaire.
- **Date initiale et finale de la simulation**
- **Intervalle de sauvegarde des résultats "peuplement"**. Ce paramètre fixe l'intervalle de temps séparant deux lignes de la table de production du peuplement produite à la fin de la simulation. Cet intervalle est fixé par défaut à un an.
- **Amplitude des classes de diamètres**. Ce paramètre sert lors de la présentation des résultats sous forme de tableau. L'amplitude est fixée par défaut à deux centimètres.
- **Utilisation d'un indice de compétition dépendant des distances**. Permet au programme de savoir s'il doit utiliser une liste des arbres voisins.
- **Intervalle d'actualisation de la liste des arbres voisins en compétition**. Lorsqu'un indice de compétition dépendant des distances est utilisé, l'actualisation de cette liste représente l'étape la plus longue d'un pas de simulation. Selon les espèces présentes dans la placette ou le dispositif, cet intervalle doit être inférieur à la fréquence de changement de statut social des arbres dans le peuplement (e.g. Delvaux 19..).

b. Feuille de données

Chaque évènement de la simulation, y compris la situation initiale, comporte quatre éléments. Un nom, qui fait référence à la plage de cellules où se situe la liste d'arbres qui lui correspond, cette même liste, la date à laquelle il se déroule et son type.

La version actuelle du logiciel distingue quatre types d'évènements:

- **La situation initiale ou de départ (D)**. La liste de départ contient le nom, l'espèce, le dhp de tous les arbres présents au moment initial de la simulation, y compris les variables obligatoires demandées par le modèle de croissance utilisé par le scénario. Une aide en ligne fournit la liste des variables obligatoires à procurer.
- **L'éclaircie (E)** qui regroupe toute sorte de coupe partielle (nettoisement, éclaircie, coupe jardinatoire, etc.). Une liste d'arbres correspondant à une éclaircie fournit uniquement le nom des arbres qui sont abattus au cours de l'éclaircie. Dans sa version actuelle, DendroSim ne reconnaît que les listes d'arbres. Dans une prochaine version, il sera capable de simuler une coupe en fonction de quelques valeurs générales (par le bas, par le haut, pourcentage de surface terrière ou de volume à prélever, normes d'aménagement du MRN).
- **La coupe totale (T)** ne requiert pas de liste. Tous les arbres de la placette sont coupés. La simulation est arrêtée.
- **La sauvegarde (S)** ne requiert également pas de liste. Cet évènement permet de sauver à un moment donnée de la simulation la liste des arbres sur pied avec la valeur de toutes les variables utilisées par le modèle de croissance.

La première ligne d'une liste donne les noms des colonnes, qui doivent être ceux qui correspondent soit aux variables obligatoires du modèle de croissance lors de la description de la situation initiale, soit au nom des arbres lors de la description d'une éclaircie (figure 20).

Une plage spéciale de la feuille de données, que nous nommerons "plage de scénario", est directement visible lorsque cette feuille est active à l'écran (figure 20). Elle regroupe le nom, le type et la date de tous les évènements qui se déroulent pendant une simulation.

L'utilisateur a la possibilité de définir plus d'évènements que ceux qui prendront effectivement lieu pendant la simulation (il suffit de ne pas les spécifier dans la plage de scénario). Cette capacité lui permet par exemple de réaliser des simulations sans une coupe particulière, afin d'évaluer son effet sur l'accroissement en volume de la placette ou la qualité de la branchaison.

3.4. Simulation

La simulation est déclenchée en activant la rubrique "Simule" du menu de DendroSim. Le programme ne requiert à ce moment aucune intervention de la part de l'utilisateur. DendroSim crée sur le bureau de l'ordinateur un dossier temporaire (DendroTemp) où il sauve sous format adéquat les données de la simulation à réaliser. Par l'intermédiaire d'AppleScript 1.1 (langage de script disponible dans le Système 7.5), DendroSim appelle FoxPro et lance les sous-routines de simulation. Celles-ci prennent en charge l'écran pour communiquer à l'utilisateur l'avancement de la simulation. Dès qu'elles ont terminé leur travail, elles laissent le contrôle à DendroSim qui charge les résultats dans le classeur-scénario, arrange les tableaux de résultats et efface le dossier temporaire.

3.5. Résultats

a. Table de production

La table de production fournit l'évolution des variables moyennes du peuplement pour chaque année de la simulation, en distinguant comme il se doit le peuplement sur pied du peuplement accessoire (tableaux 3 et 4, e.g. Rondeux 1993).

b. Liste des résultats

Une liste d'arbres est fournie dans une feuille de calcul du classeur-scénario ("Résultats"). Celle-ci intègre les différents états de la liste d'arbres de la placette ou du dispositif au moment des événements du scénario et donne les valeurs de toutes les variables utilisées par le modèle de croissance.

c. Tableau de synthèse des résultats

La version actuelle du logiciel offre sur une feuille de calcul du classeur-scénario actif ("Détails") un seul tableau de synthèse des résultats. Celui-ci se présente sous la forme d'un tableau croisé dynamique (chapitres 24 et 25 du "Guide de l'utilisateur" d'Excel 5.0) et permet d'exploiter la liste des résultats. Les données standards fournies par le tableau correspondent au nombre de tiges, la surface terrière et le volume à l'hectare. Les champs standards du tableau représentent les noms ou les dates des événements du scénario, les espèces rencontrées, les classes de diamètre et les classes commerciales de diamètre (moins de 10 cm, 10 à 23 cm et 24 cm et plus). Ces champs peuvent être placés en mode

Tableau 3: Table de production. Bloc Faible (simulation entre 1987 et 1995)

Date	Peuplement principal										Eclaircies			Peuplement total			
	Hdom [ml]	Ddom [cm]	dhp_q [cm]	N [tfg/ha]	G [m ² /ha]	V [m ³ /ha]	iD [cm/an]	iG [m ² /ha/an]	iV [m ³ /ha/an]	dhp_q [cm]	N [tfg/ha]	G [m ² /ha]	V [m ³ /ha]	dhp_q [cm]	N [tfg/ha]	G [m ² /ha]	V [m ³ /ha]
1987	19.6	21.92	14.77	1544	26.45	182.06								14.77	1544	26.45	182.06
1987	19.1	21.56	17.52	636	15.34	109.81	2.75			12.48	908	11.11	72.25	14.77	1544	26.45	182.06
1988	19.1	21.71	17.66	636	15.58	112.78	0.14	0.25	2.97					14.84	1544	26.69	185.03
1989	19.3	21.85	17.79	636	15.81	115.86	0.13	0.23	3.08					14.90	1544	26.92	188.11
1990	19.6	22.00	17.93	636	16.06	119.14	0.14	0.25	3.28					14.97	1544	27.17	191.39
1991	19.9	21.95	18.07	636	16.32	122.66	0.14	0.26	3.52					15.04	1544	27.43	194.91
1992	20.2	22.11	18.23	636	16.60	126.43	0.16	0.28	3.77					15.12	1544	27.71	198.68
1993	20.4	22.28	18.39	636	16.89	130.44	0.16	0.29	4.02					15.20	1544	28.00	202.69
1994	20.7	22.46	18.56	636	17.20	134.71	0.17	0.31	4.27					15.28	1544	28.31	206.96
1995	21.0	22.64	18.73	636	17.51	138.97	0.18	0.33	4.51					15.36	1544	28.62	211.22

Tableau 4: Table de production. Bloc Fort (simulation entre 1987 et 1995)

Date	Peuplement principal							Eclaircies			Peuplement total						
	Hdom [m]	Ddom [cm]	dhp_q [cm]	N [tig/ha]	G [m ² /ha]	V [m ³ /ha]	id [cm/an]	iG [m ² /ha/a n]	iV [m ³ /ha/a n]	dhp_q [cm]	N [tig/ha]	G [m ² /ha]	V [m ³ /ha]	dhp_q [cm]	N [tig/ha]	G [m ² /ha]	V [m ³ /ha]
1987	20.6	21.64	16.15	1560	31.94	238.28								16.15	1560	31.94	238.28
1987	20.3	21.80	18.69	460	12.62	97.43	2.54			14.95	1100	19.32	140.86	16.15	1560	31.94	238.28
1988	20.6	22.06	18.90	460	12.91	99.63	0.21	0.288						16.22	1560	32.23	240.48
1989	20.8	22.33	19.13	460	13.22	102.06	0.23	0.311						16.30	1560	32.54	242.91
1990	21.1	22.61	19.37	460	13.56	104.69	0.24	0.335						16.38	1560	32.87	245.54
1991	21.3	22.90	19.62	460	13.91	107.51	0.25	0.354						16.47	1560	33.23	248.36
1992	21.5	23.20	19.89	460	14.29	110.53	0.27	0.375						16.56	1560	33.60	251.38
1993	21.8	23.52	20.16	460	14.68	113.75	0.27	0.397						16.66	1560	34.00	254.60
1994	22.0	23.84	20.44	460	15.10	117.17	0.28	0.417						16.76	1560	34.42	258.03
1995	22.2	24.18	20.74	460	15.54	120.80	0.30	0.439						16.87	1560	34.86	261.66

ligne, colonne ou page selon les désirs de l'utilisateur. Les tableaux 5 et 6 ainsi que les graphiques 22, 23 et 28, 29 proviennent des données fournies par ce tableau de synthèse.

L'utilisateur qui le souhaite peut modifier le tableau dynamique et lui rajouter d'autres données et d'autres champs. Par exemple, il pourrait rajouter un champ figurant le nom des arbres et visualiser dans le tableau l'évolution de certaines caractéristiques telles la hauteur et la longueur des premières branches du houppier de lumière de tous les érables à sucre du dispositif, ayant un diamètre supérieur à 24 cm.

4. Validation

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. La région d'étude est particulièrement riche en données pour analyser la validité du modèle. Il y a entre autres les placettes permanentes du MRN sur le territoire ainsi que deux dispositifs d'éclaircie du Service canadien des forêts. Le chapitre fait état des validations effectuées avec les données de deux blocs de mesurage du dispositif d'éclaircie de Squatec.

4.1. Généralités sur le dispositif d'éclaircie

Il s'agit d'une jeune futaie régulière d'érable à sucre (figure 2, 47°43'N 68°34'O, 350 m d'altitude, 5.85 ha) 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 (Trencia 1985). Il provient très probablement d'une coupe totale effectuée dans la première moitié des années '40. Parmi les données directement exploitables, il faut retenir les suivantes :

- 1982 : Démarcation du peuplement, énumération des arbres et inventaire des dhp.
- 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.

- 1988 : Mesure de la projection des cimes sur 4 points
- 1989 : Mesure dhp, hauteur totale, hauteur de la base du houppier et projection de cime sur 8 points
- 1991 : Mesure dhp, hauteur totale, hauteur de la base du houppier et projection de cime sur 8 points.

Ces données devraient permettre de déceler une réaction à l'éclaircie entre 1987 et 1991. Ce dispositif a déjà fait l'objet d'une publication (Ung et Trencia 1989).

La validation a consisté à comparer la moyenne de l'accroissement en hauteur totale, en rayon du houppier et en volume de la tige entre les automnes de 1987 et 1991, dans les deux blocs précités du dispositifs.

4.2. Bloc "faible"

Juste avant l'éclaircie pratiquée en 1987, le peuplement se constituait avant tout d'érable à sucre de petite dimension accompagné de quelques bouleaux jaunes de fort diamètre, sans doute rémanents du peuplement précédent (tableaux 3 et 5, figures 21 et 22). L'éclaircie a quasi éliminé l'étage dominé du peuplement ainsi que les rémanents du peuplement antérieur. Le prélèvement s'est élevé approximativement à 40% du volume ou de la surface terrière marchande avant éclaircie, l'accroissement technique en diamètre moyen quadratique étant de 2.75 cm. Il s'agit donc d'une éclaircie forte par le bas (figure 23), qui se situe très exactement à la limite supérieure des normes de l'éclaircie commerciale dans les peuplements de feuillus tolérants (MRN 1992).

La prédiction de l'accroissement en hauteur s'entache d'un biais positif important (figure 24). Ce biais ne peut pas provenir de l'estimation de l'IQS. En effet, l'IQS ne peut pas être sur-estimé, il peut seulement être sous-estimé lorsque par exemple le peuplement subit une ou deux phases d'oppression. Le biais doit donc provenir de l'utilisation de l'éq. 3. Trois hypothèses peuvent être émises à ce stade:

1. soit les courbes de productivité de Carmean (1981) ne sont pas adaptées à la région du Témiscouata.
2. soit la structure de l'éq. 3 n'est pas totalement correcte (manque de variables explicatives, forme logistique de l'équation incorrecte). L'éclaircie par le bas pratiquée dans les deux blocs a laissé sur pied des arbres dominants et codominants qui ont pratiquement le même statut social et ainsi la même valeur du gradient de hauteur. En conséquence l'éq. 3 prévoira un accroissement en hauteur quasi

Figure 21 :
Bloc Faible -
Projection des cimes

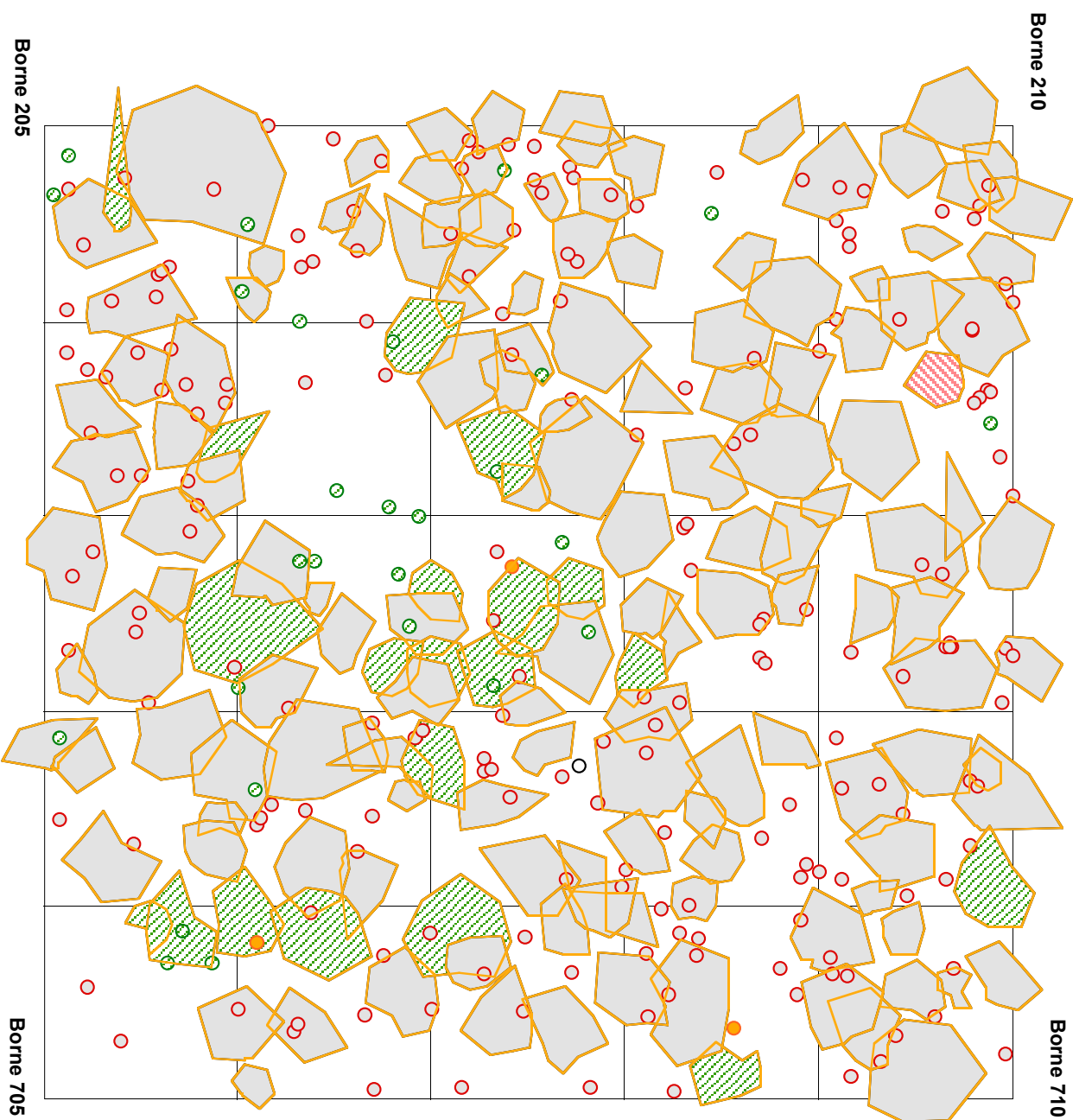


Tableau 5: Caractérisation de l'éclaircie pratiquée en 1987 dans le bloc "faible"

Classes commerciales	Prélevé			Laisser sur pied					Total	
	ERS	HEG	BOJ	ERR	ERS	HEG				
Nha	< 10 cm	456	52		508		20	4	24	532
	10 à 23 cm	320	36		356	4	484	76	564	920
	24 et plus	8	24	12	44		48		48	92
	Total	784	112	12	908	4	552	80	636	1544
Gha	< 10 cm	1.32	0.15		1.47		0.09	0.01	0.11	1.58
	10 à 23 cm	4.42	0.54		4.96	0.07	9.77	1.11	10.95	15.91
	24 et plus	0.32	2.20	0.96	3.47		2.57		2.57	6.04
	Total	6.07	2.89	0.96	9.91	0.07	12.43	1.12	13.62	23.53
Vha	< 10 cm	7.46	0.77		8.23		0.59	0.06	0.66	8.89
	10 à 23 cm	33.74	3.70		37.44	0.62	78.14	8.15	86.91	124.35
	24 et plus	2.18	17.60	6.79	26.58		22.24		22.24	48.82
	Total	43.38	22.07	6.79	72.25	0.62	100.97	8.22	109.81	182.06

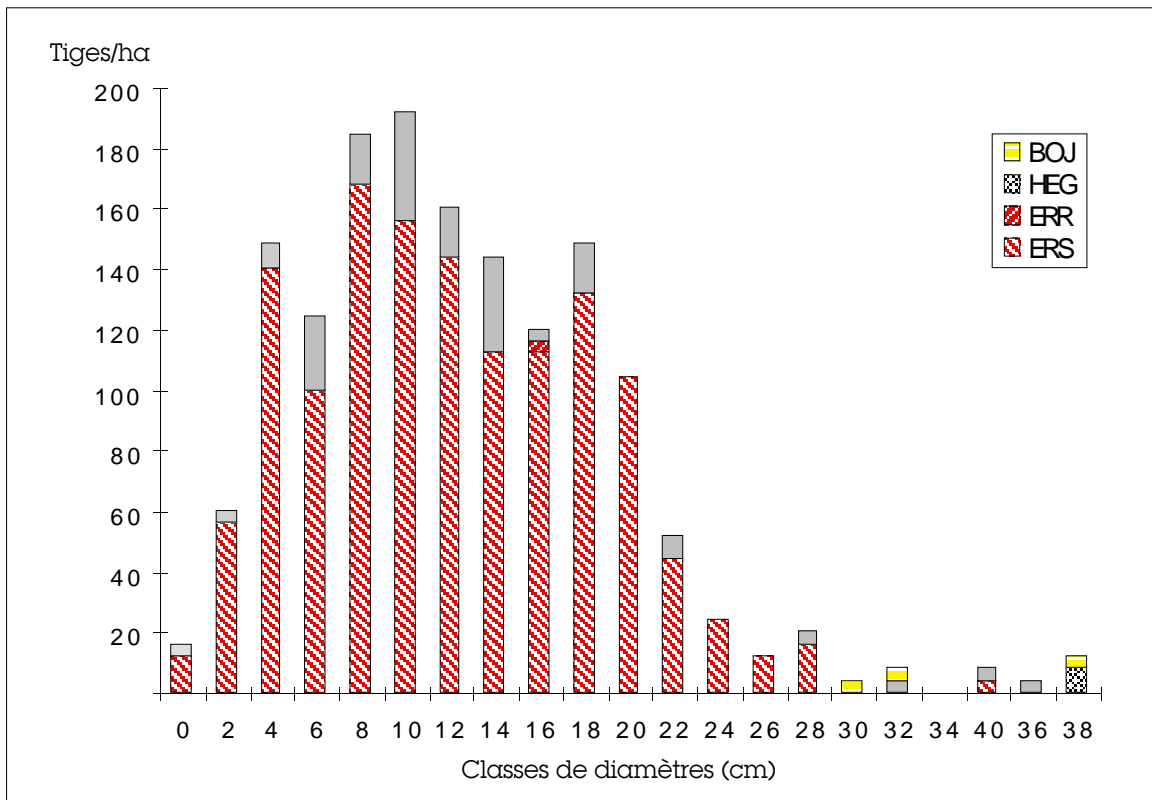


Figure 22: Dispositif de Squatec, bloc "faible". Répartition du nombre de tige à l'hectare par classes de diamètres. Situation en 1987, avant éclaircie.

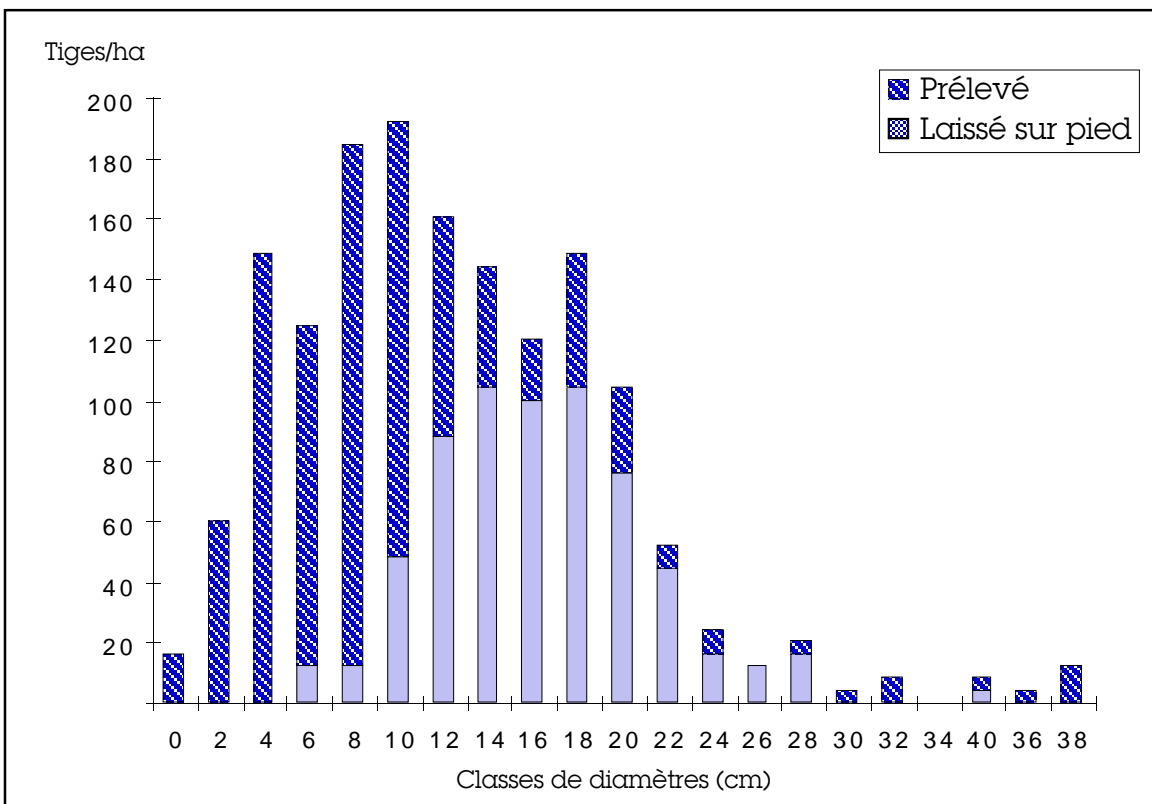


Figure 23: Dispositif de Squatec, bloc "faible". Effet technique de l'éclaircie pratiquée en 1987 sur la distribution des tiges à l'hectare.

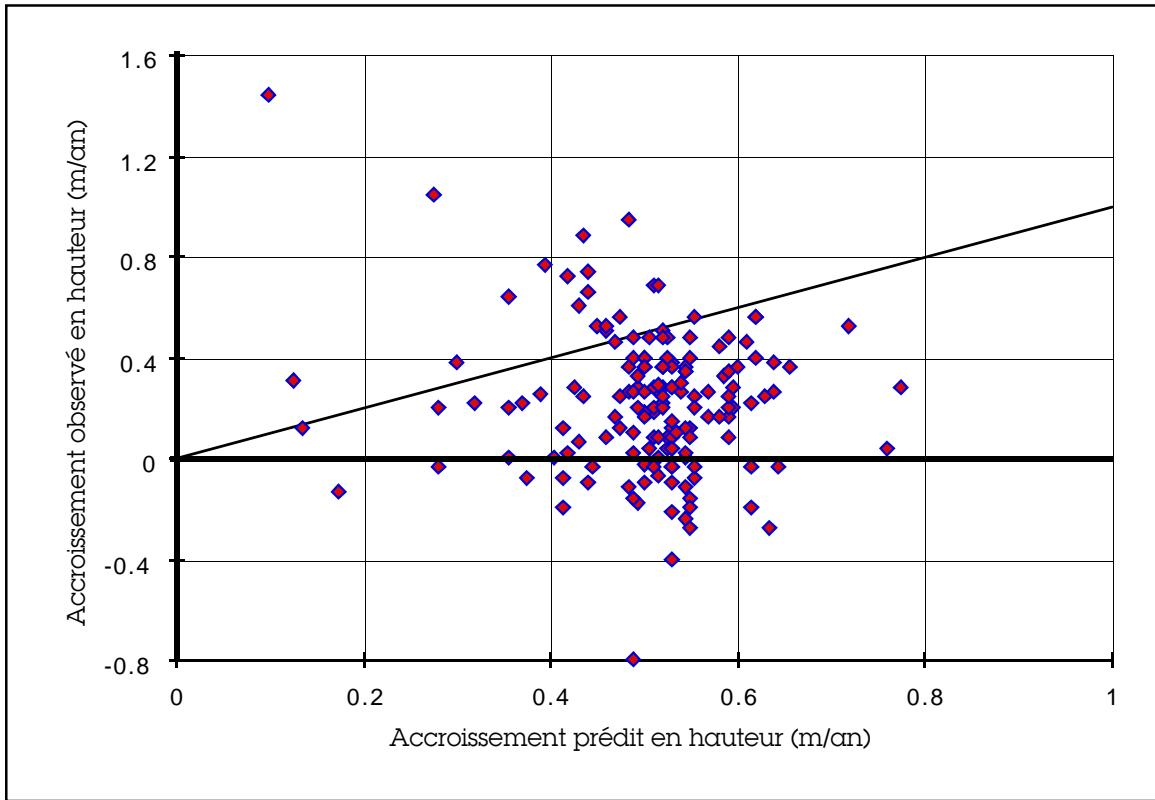


Figure 24: Dispositif de Squatec, bloc "faible". Accroissement annuel courant en hauteur observé et prédit entre 1987 et 1991.

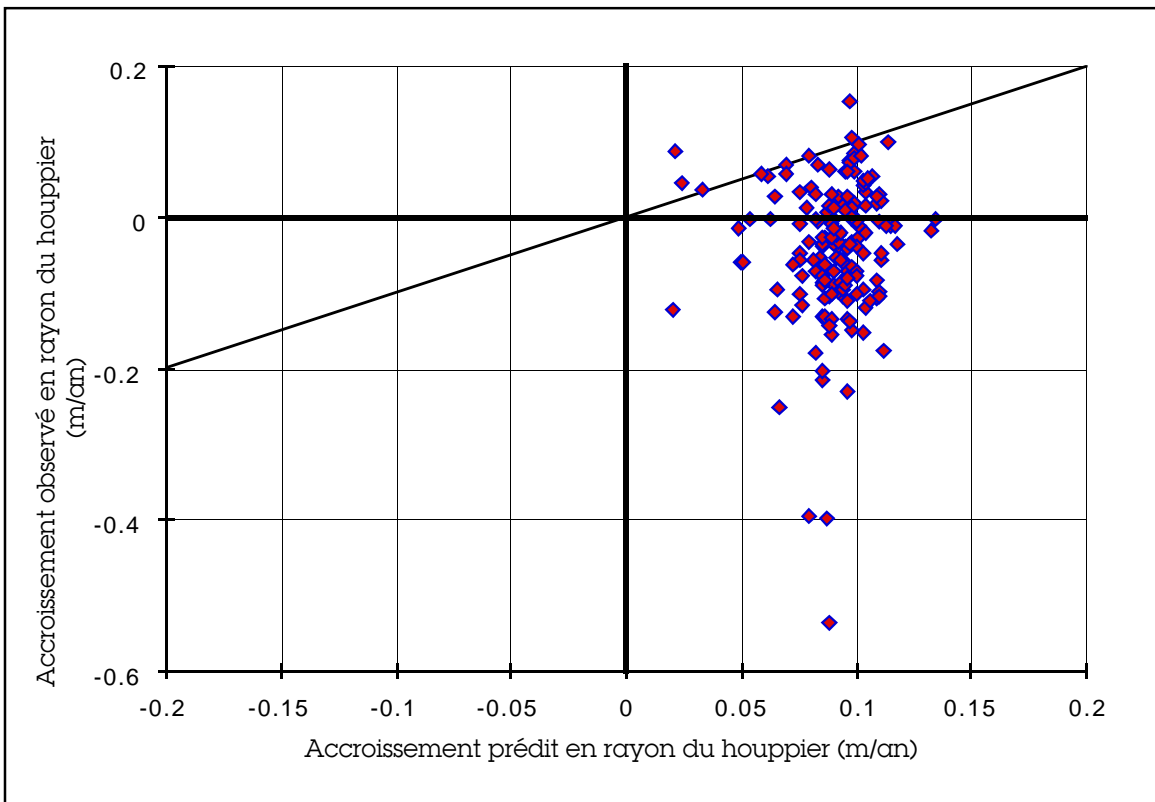


Figure 25: Dispositif de Squatec, bloc "faible". Accroissement annuel courant en rayon du houppier observé et prédit entre 1987 et 1991.

constant et égal à l'accroissement en hauteur potentiel. Ceci expliquerait la forme verticale du nuage de points de la figure 24.

3. soit la réaction de la croissance en hauteur est en retard par rapport au changement de statut social provoqué par l'éclaircie. Ces trois hypothèses sont actuellement à l'étude.

Il faut également observer sur la figure 24 la présence d'accroissements observés négatifs. Leur présence est tout à fait normale. Ceux-ci découlent en effet des erreurs de mesure faites pendant les deux remesurages des blocs, d'autant plus que l'intervalle de temps entre les deux mesures est seulement de 5 ans.

Le même phénomène s'observe également avec l'accroissement en rayon du houppier (figure 25). La prévision de l'accroissement du rayon du houppier découle directement de l'accroissement en hauteur (éqs. 15 et 20). Une partie seulement de ce biais est ainsi provoquée par le biais existant dans la prévision de l'accroissement en hauteur. Une autre partie du biais provient du changement de méthode de mesure de la projection des cimes entre 1987 et 1991 (figure 26).

La prédiction de l'accroissement en volume, quant à lui, s'entache d'un biais négatif qui tend à augmenter avec l'accroissement (figure 27). Ce biais est sans doute dû à l'utilisation dans le modèle de croissance de l'équation expliquant l'accroissement en volume présentée dans ce document (éq. 9). Pour une même surface du houppier de lumière, deux arbres de statut social différent croîtront différemment. Cette constatation équivaut à dire que la relation entre la surface du houppier de lumière et la surface foliaire change avec l'éclaircie, ou encore à invalider l'hypothèse de la constance de la dimension fractale du houppier. Il faut donc reconsidérer la structure de l'éq. 9.

4.3. Bloc "fort"

Les caractéristiques dendrométriques du bloc fort sont pratiquement identiques à celle du bloc faible, quoique le peuplement soit un peu plus dense (figures 28 à 30, tableaux 4 et 6). L'éclaircie pratiquée en 1987 dans le bloc fort s'apparente à une éclaircie très forte par le bas (accroissement technique en diamètre moyen quadratique de 2.54 cm, 60% de la surface terrière marchande enlevée). Cette éclaircie est en dehors des normes sylvicoles du MRN pour les peuplements de feuillus tolérants (MRN 1992).

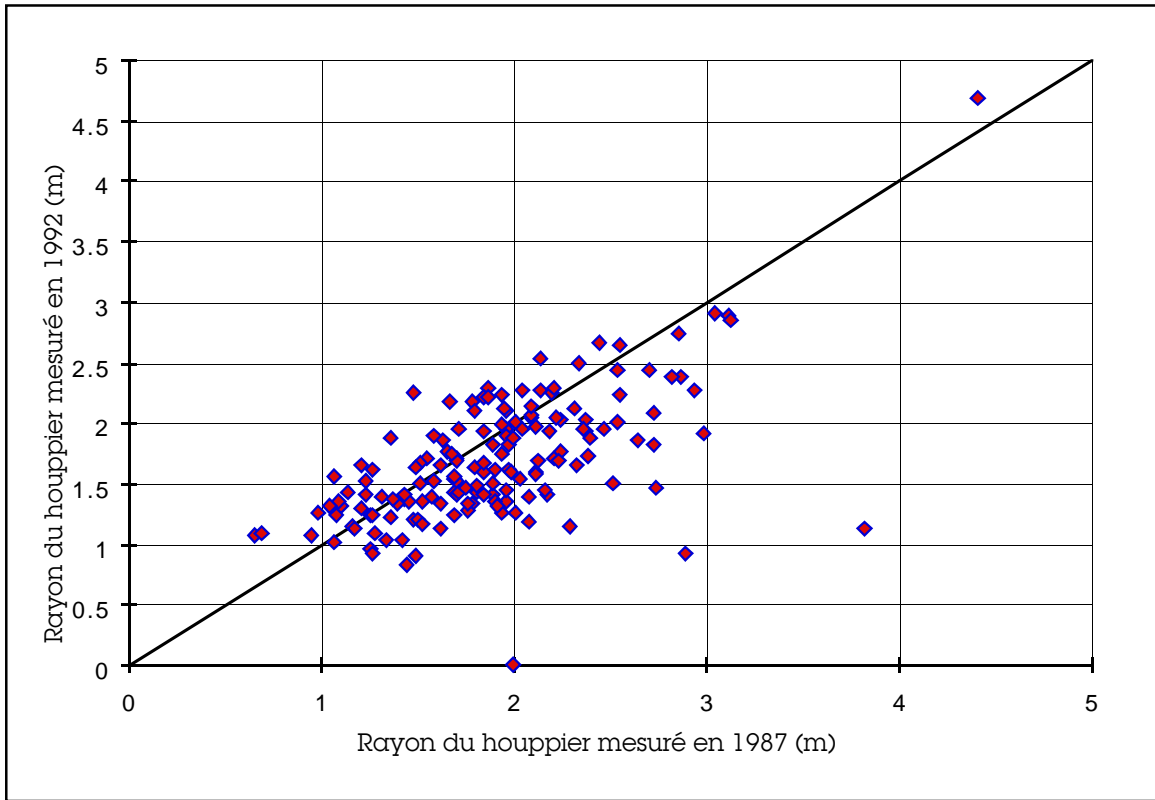


Figure 26: Dispositif de Squatec, bloc "faible". Relation entre le rayon du houppier mesuré en 1987 et en 1991.

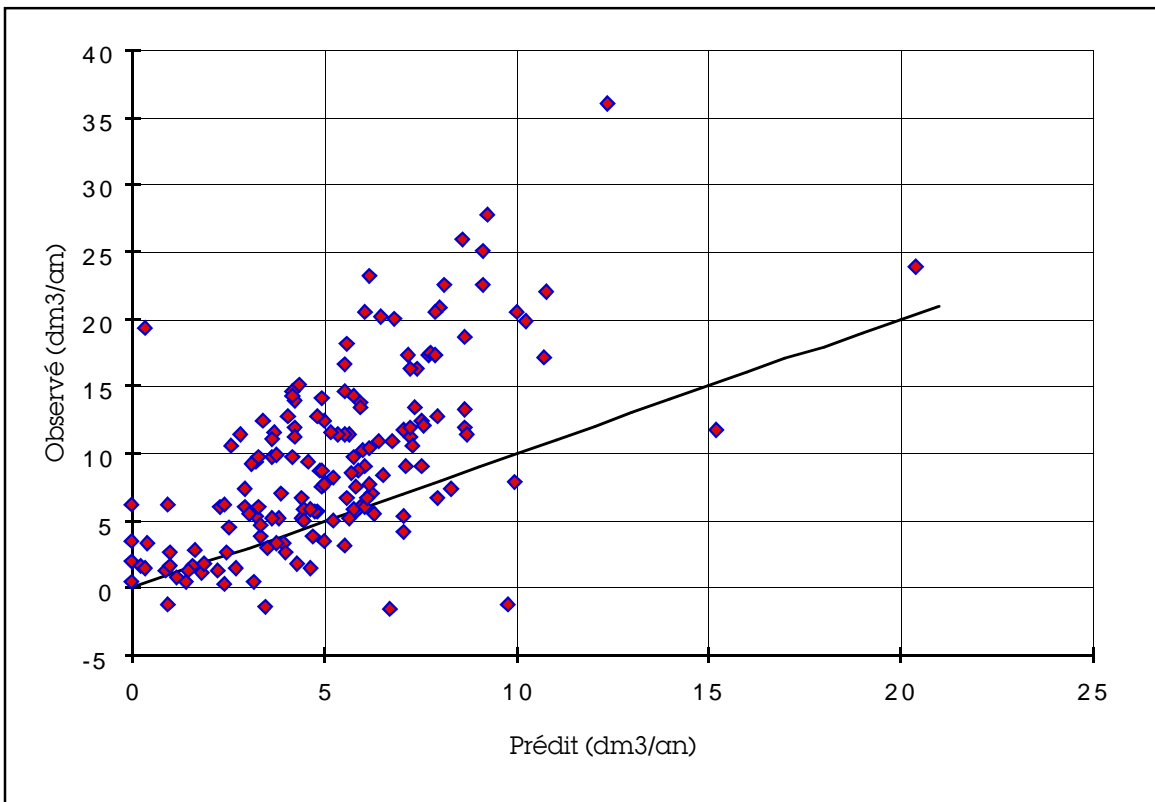


Figure 27: Dispositif de Squatec, bloc "faible". Ecart entre l'accroissement annuel courant observé et prédit en volume de la tige (1987-1991).

Figure 28:
Bloc Fort -
Projection des cimes

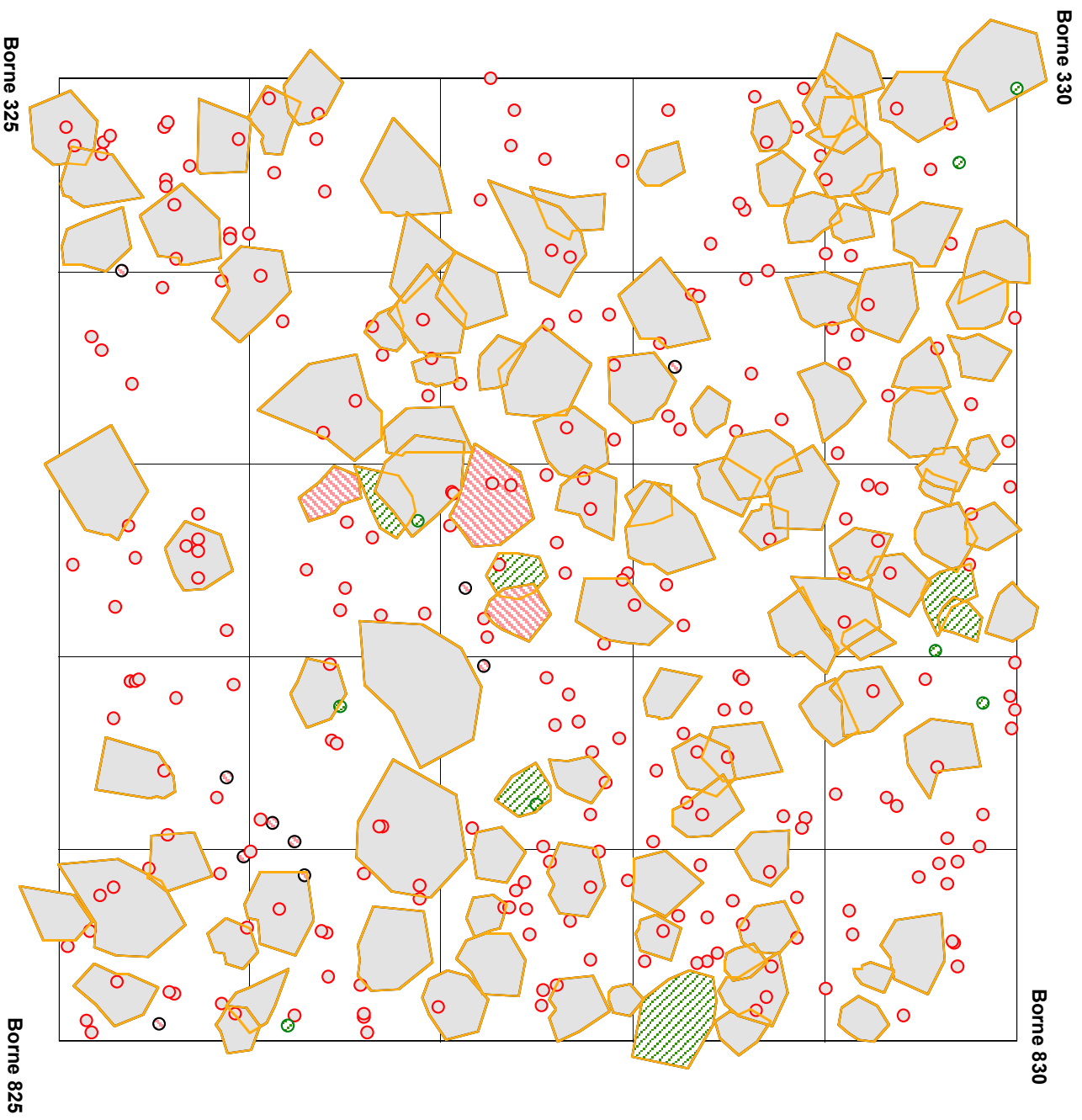


Tableau 6: Caractérisation de l'éclaircie pratiquée en 1987 dans le bloc "fort"

Classes commerciales	Prélevé					Lissé sur pied				Grand Total
	ERR	ERS	FRN	HEG	Total	ERR	ERS	HEG	Total	
Nha	< 10 cm	372			16		4		4	392
	10 à 23 cm	32	572	4	16	12	368	24	404	1028
	24 et plus	4	84				52		52	140
	Total	36	1028	4	32	12	424	24	460	1560
Gha	< 10 cm		1.09		0.04		0.02		0.02	1.16
	10 à 23 cm	0.68	10.53	0.13	0.20	0.38	7.99	0.35	8.72	20.27
	24 et plus	0.22	4.28				2.47		2.47	6.96
	Total	0.90	15.90	0.13	0.25	0.38	10.48	0.35	11.21	28.39
Vha	< 10 cm		6.27		0.18		0.19		0.19	6.64
	10 à 23 cm	5.64	87.20	1.21	1.54	3.16	68.60	2.72	74.48	170.08
	24 et plus	1.68	35.50				21.53		21.53	58.71
	Total	7.32	128.97	1.21	1.72	3.16	90.32	2.72	96.20	235.43

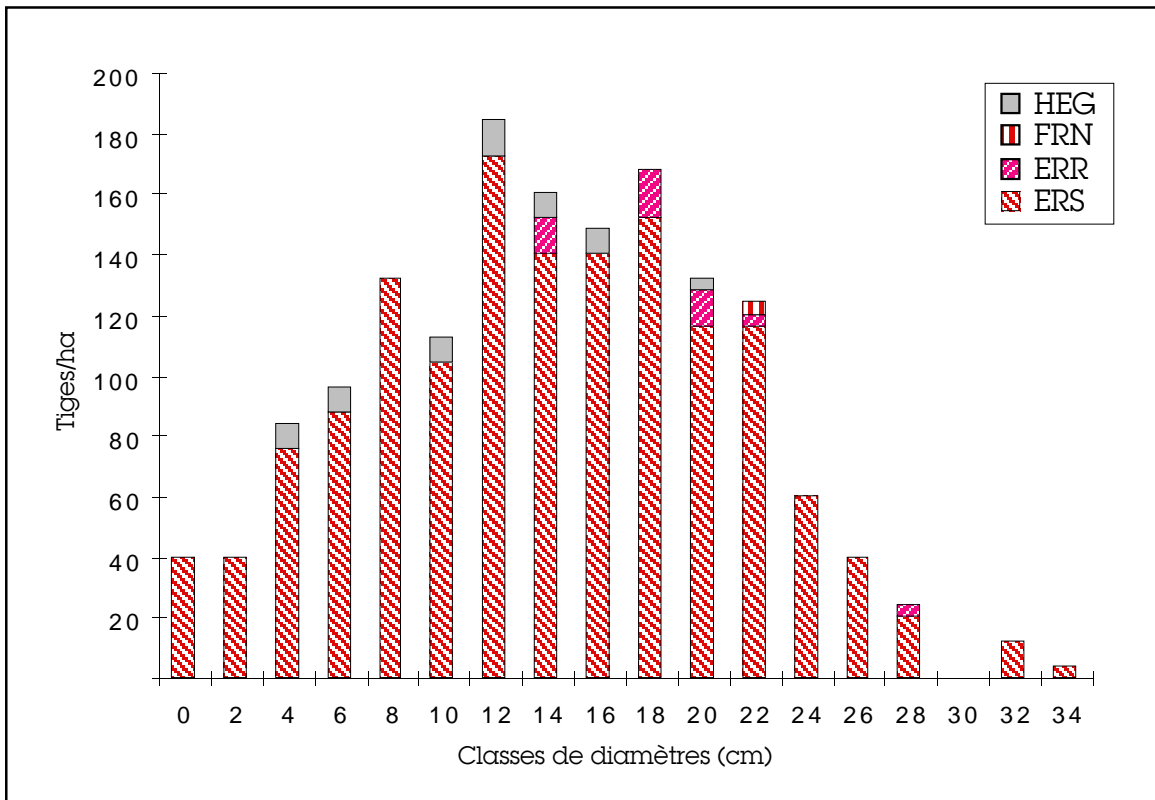


Figure 29: Dispositif de Squatec, bloc "fort". Répartition du nombre de tige à l'hectare par classes de diamètres. Situation en 1987, avant éclaircie.

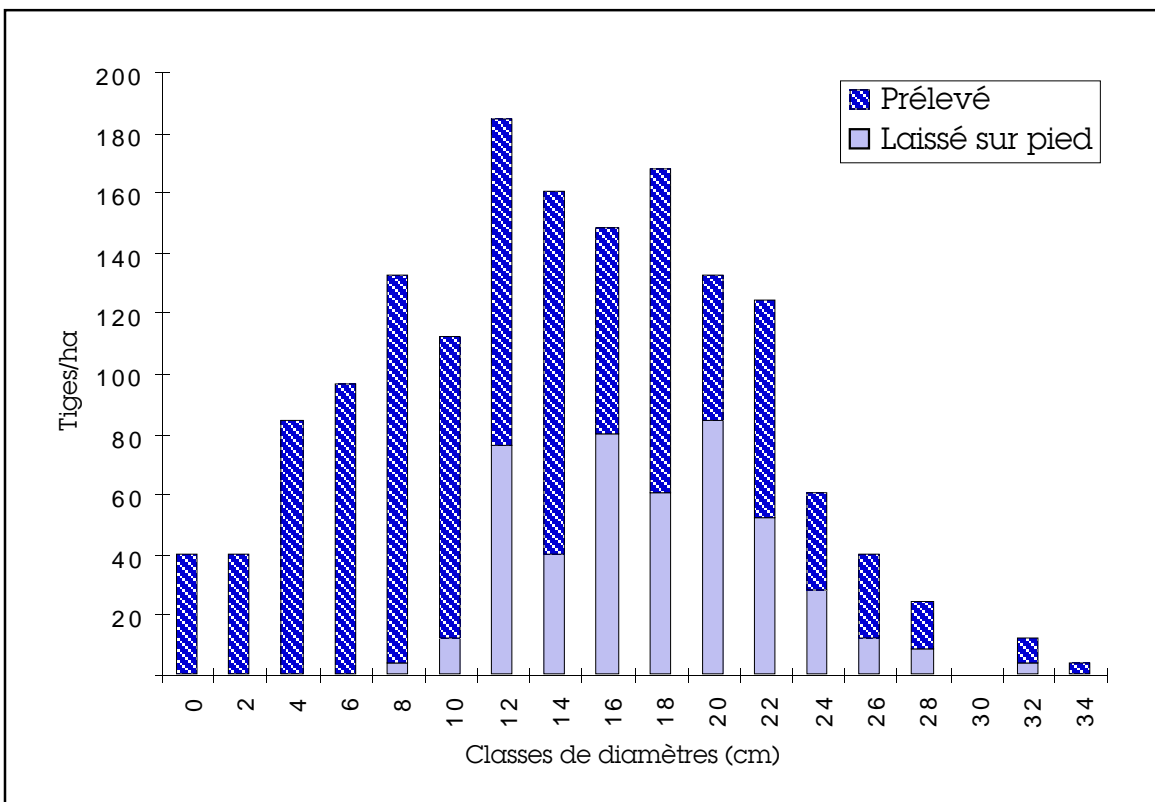


Figure 30: Dispositif de Squatec, bloc "fort". Effet technique de l'éclaircie pratiquée en 1987 sur la distribution des tiges à l'hectare.

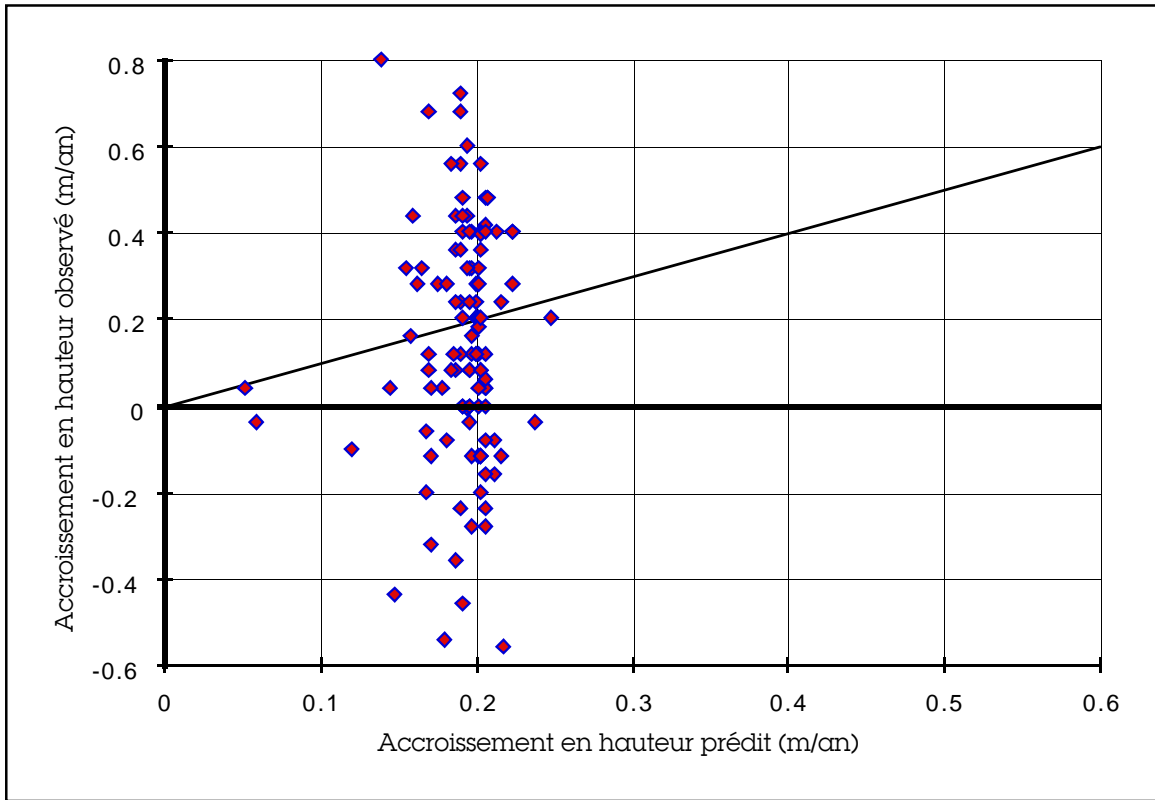


Figure 31: Dispositif de Squatec, bloc "fort". Accroissement annuel courant en hauteur observé et prédit entre 1987 et 1991.

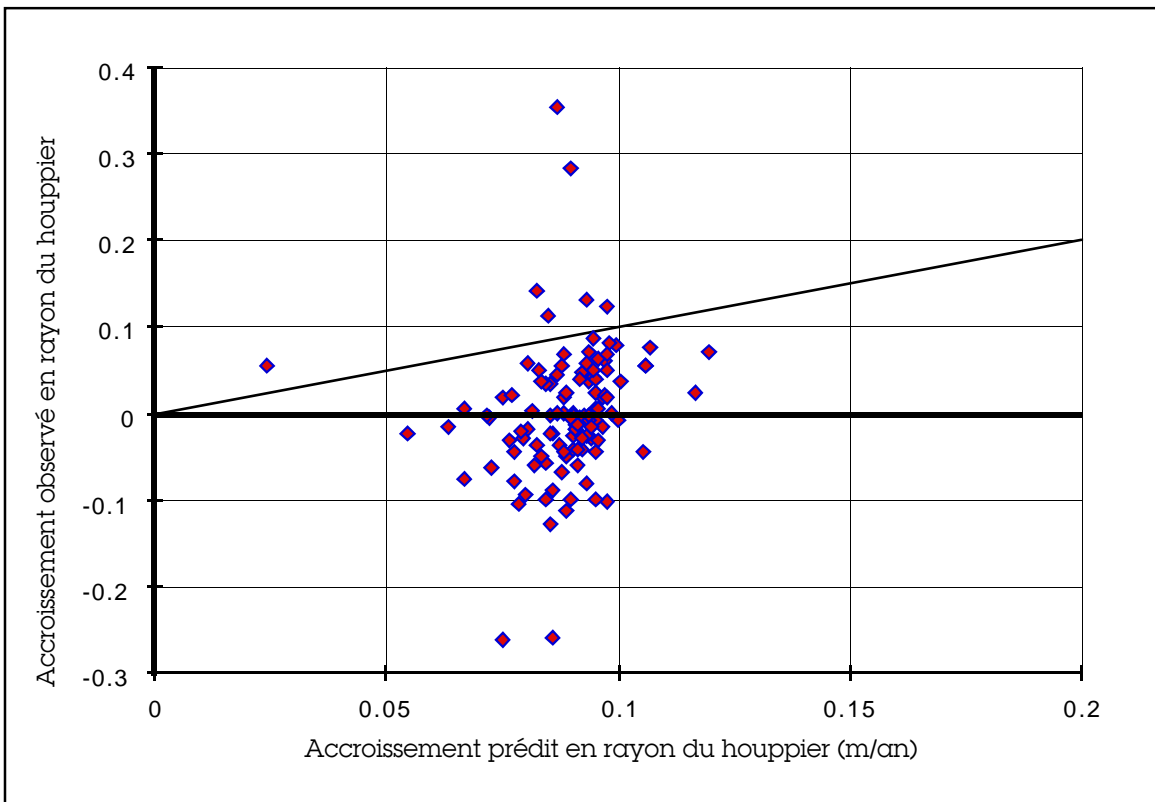


Figure 32: Dispositif de Squatec, bloc "Faible". Accroissement annuel courant en rayon du houppier observé et prédit entre 1987 et 1991.

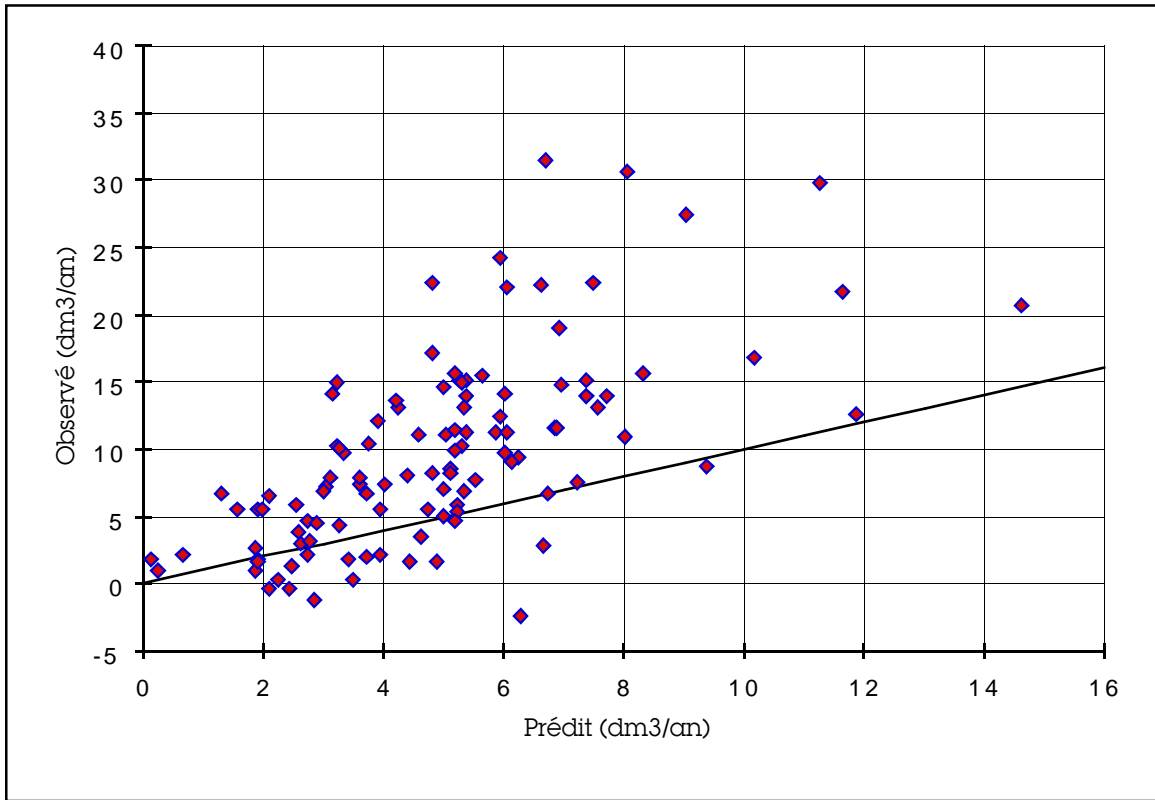


Figure 33: Dispositif de Squatec, bloc "Fort". Ecart entre l'accroissement annuel courant observé et prédit en volume de la tige (1987-1991).

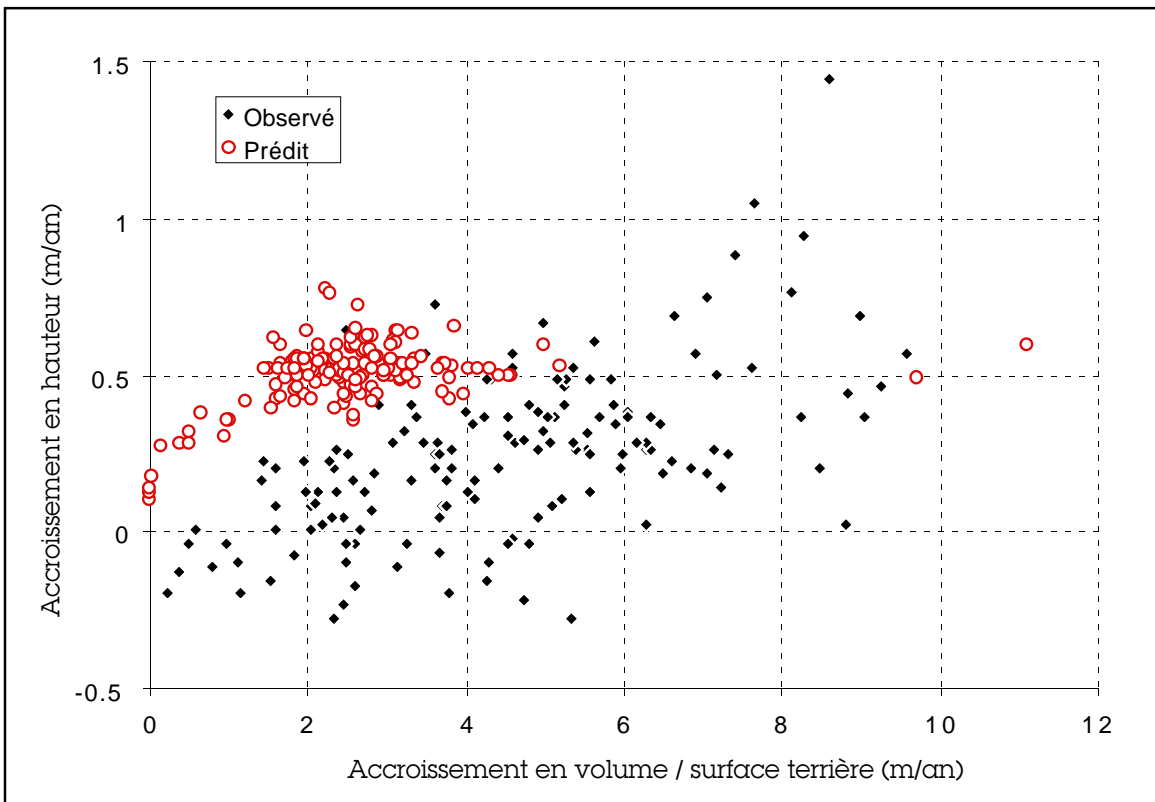


Figure 34: Dispositif de Squatec, bloc "Faible". Relation entre l'accroissement en hauteur et le rapport entre l'accroissement en volume et la surface terrière.

La comparaison des accroissements prédits et observés en hauteur, rayon du houppier et volume sous écorce de la tige conduit aux mêmes conclusions que celles rapportées pour le bloc faible (figures 31 à 33).

5. Conclusions

Le modèle de croissance qui est présenté considère la croissance d'arbres individuels et se base sur une compréhension partielle du processus de croissance, à partir du développement du houppier. Cette approche permet de considérer directement la modélisation de la branchaison et conséquemment la qualité du bois. Elle ne dépend pas de la structure du peuplement qui, nous l'avons vu, est extrêmement variable dans les érablières du comté du Témiscouata. Elle permet de considérer l'effet du mélange des espèces sur la croissance. D'une façon générale, toutes les équations du modèle ont un excellent comportement statistique (bonne corrélation, bonne structure des résidus). Leur forme découle directement de considérations théoriques sur la croissance.

Un logiciel de croissance a été mis au point et permet de simuler facilement la croissance de placettes d'échantillonnage ou de dispositifs expérimentaux tel celui de Squatec. Puisque le modèle de croissance est intégré à tout scénario imaginé par son utilisateur, ses équations et ses variables sont modifiables à souhait.

La validation du modèle avec l'aide de deux remesurages dans le dispositif d'éclaircie de Squatec a fait apparaître deux faiblesses du modèle de croissance, localisées dans les équations modélisant la croissance en hauteur et en volume. Un certain nombre de dispositions ont été prises pour les corriger:

1. Six nouvelles placettes complémentaires ont été mesurées pendant l'été 1995 (deux gaulis, deux perchis et deux futaies) dans la même région d'étude afin d'étayer la base de données du modèle de croissance. Leur protocole de mesure a été modifié pour mesurer la surface foliaire des arbres centraux, en vue d'analyser directement la relation entre la surface foliaire et la surface du houppier de lumière. Cette modification permettra également de calculer les coefficients d'allocation de la production aérienne à la tige centrale et aux branches.
2. Les blocs forts et faibles du dispositif de Squatec ainsi que deux autres blocs (bloc témoin et bloc "Pin blanc") ont été remesurés cet été. Ce remesurage étayera la base de données réservée à la validation. Pour les deux premiers blocs, 20 arbres par bloc ont été sélectionnés d'après leur statut social avant et après éclaircie.

L'extrémité de deux branches situées à la base du houppier de lumière de ces arbres a été prélevée pour mesurer de façon plus précise l'accroissement en rayon du houppier. D'autres caractéristiques du houppier de lumière ont également été mesurées (hauteurs d'insertion et de l'apex des branches), afin de valider le module de branchaison.

Une fois ces deux faiblesses éliminées, il est prévu d'incorporer au modèle de croissance un module de branchaison qui caractérisera la distribution des diamètres des branches des deux houppiers. Il est également prévu de poursuivre la validation du modèle à l'aide des 10 placettes permanentes situées dans des érablières du comté (figure 2).

6. Références bibliographiques

- Assman E. 1970. The principles of forest yield study. Pergamon Press, Oxford.
- Bickelhaupt D.H., Leaf A.L. et Richards N.A. 1973. Effect of branching habit on above-ground dry weight estimates of *Acer saccharum* stands. *In* IUFRO Biomass Studies. Edité par H.E. Young. University of Maine, Orono, Maine. pp 221-230.
- Biging, G.S. et Dobbertin, M. 1992. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. *For. Sci.* **38**: 695-720.
- Burger H. 1939. Baumkrone und Zuwachs in zwei hiebsreifen Fichtenbeständen. *Mitt. Schweiz. Anstl. Forstl. Verwes.* 21: 147-175.
- Carmean W.H., Hahn J.T. and Jacobs R.D. 1984. Site index curves for forest tree species in the Eastern United States. USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station, General Technical Report NC-128.
- Carpentier J.-P. 1987. Modélisation de la croissance et du rendement des peuplements d'éérable à sucre. Mémoire n° 91, Direction de la Recherche et du Développement, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, 160 p.
- Cluzeau C., Le Goff N. et Ottorini J.-M. 1994. Development of primary branches and crown profile of *Fraxinus excelsior*. *Can. J. For. Res.* **24**: 2315-2323.
- Colin F. et F. Houllier 1991. Branchiness of Norway spruce in northeastern France: modelling vertical trends in maximum nodal branch size. *Ann. Sci Forest*, **48**: 679-693.

- Deleuze C. et Houllier F. 1995. Prediction of stem profile of *Picea abies* using a process-based tree growth model. *Tree physiology* 15: 113-120.
- de Rosnay J. 1975. *Le microscope, vers une vision globale*. Editions du Seuil, Paris.
- Edelin C. 1991. Nouvelles données sur l'architecture des arbres sympodiaux: le concept de plan d'organisation. *In L'arbre, biologie et développement. Edité par C. Edelin. Actes du 2ème Colloque international sur l'Arbre, Naturalia Monspelienis numéro hors série A7, Montpellier, France. pp 127-154*
- Giguère R. 1993. Portrait des ressources, secteur Est-du-Lac. Groupement Forestier de l'Est du Lac Témiscouata, Auclair, 18 p.
- Grandtner 1966. *La végétation forestière du Québec méridional*. Presses Univ. Laval, Québec, 216p.
- Ingestad T. et Ågren G.I. 1991. The influence of plant nutrition on biomass allocation. *Ecological Applications* 1:168-174.
- Inose M. 1982. A tree growth model based on crown competition in Todomatsu (*Abies sachalinensis* Mast.). (I) The relationship between crown development and volume increment. *Bull. of the Forestry and Forest Products Research Institute (Japan)* 318 : 103-127.
- Kaipiainen L. et Hari P. 1985. Consistencies in the structure of scots pine. *In Crop physiology of forest trees. Edited by P.M.A. Tigersted, P. Puttonen et V. Koski. Proceedings of an International Conference on Managing Forest Trees as Cultivated Plants, held in Finland, July 23-28, 1984. pp 31-37.*
- Kellomäki S., Salminen R., Hari P., Ventilä M., Kanninen M, Kauppi P. et Smolander H. 1979. A method for approximating the photosynthetic production of stand members inside the canopy. *J. Appl. Ecology* 16: 243-252.
- Lanner, R.M. 1985. On the insensitivity of height growth to spacing. *For. Ecol. Manage.* **13**: 143-148.
- Leakey R. 1985. Prediction of branching habit in clonal *Triplochiton scleroxylon*. *In Crop physiology of forest trees. Edité par P.M.A. Tigersted, P. Puttonen and V. Koski. Proceedings of an International Conference on Managing Forest Trees as Cultivated Plants, held in Finland, July 23-28, 1984. pp 71-80.*
- Maguire D.A., Moeur M. et Bennett W.S. 1994. Models for describing basal diameter and vertical distribution of primary branches in young Douglas-fir. *For. Ecol. Manage.* **63**: 23-55.

- Ministère des Ressources Naturelles du Québec 1992. Manuel d'aménagement forestier. Gouvernement du Québec, Québec.
- Mitchell K.J. 1975. Dynamics and simulated yield of Douglas-fir. Monograph 17, For. Sci., Soc. Am. For.
- Monserud, R.A. 1984. Height growth and site index curves for inland Douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. *Forest Science*, **30**: 943-965
- Ouellet D. 1983. Equations de prédiction de la biomasse de douze essences commerciales du Québec. Rapport d'information LAU-X-62, Forêts Canada, Région du Québec.
- Perron J.-Y. 1983. Tarif de cubage général. Volume marchand brut. Min. Energie et Ressources du Québec, Serv. inv. for., Québec.
- 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.
- Richmond B., Peterson S. et Boyle D. 1990. Stella II: user's guide. High Performance Systems, Hanover, New-Hampshire.
- Saucier J.-P. 1994. Le point d'observation écologique - Guide pour la prise de notes. Direction de la gestion des stocks forestiers, Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Québec.
- Schütz J.-P. 1989. Zum Problem der Konkurrenz in Mischbeständen. *Schweiz. Z. Forstwes.* **140**: 1069-1083.
- Thibault M. 1985. Les régions écologiques du Québec méridional. Service de la Rech. (Terres et Forêts). Ministère de l'Energie et des Ressources, Québec, 1 carte.
- Thornley J.H.M. et Johnson I.R. 1990. Plant and crop modelling. Clarendon Press, Oxford.
- Tomé M. et Burkhart H.E. 1989. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *For. Sci.* 35: 816-831.
- 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.
- Ung C.H. et Trencia J. 1989. Accroissement et qualité des tiges de deux jeunes futaies au Témiscouata. *For. Chron.* 65: 196-205.

Zeide B. et Gresham C.A. 1991. Fractal dimensions in three loblolly pine plantations of coastal South Carolina. *Can. J. For. Res.* 21:1208-1212.

Zeide B. et Pfeifer P. 1990. A method for estimation of fractal dimension of tree crowns. *For. Sci.* 37:1253-1265.

Annexe 1. Mesures effectuées dans les placettes complémentaires en 1994.

La première année du projet (été 94) a fait l'objet de mesures dans 9 placettes, sur la gamme moyenne des stations où se rencontre l'érable à sucre, à proximité des deux dispositifs expérimentaux de Lejeune et de Squatec (trois gaulis, trois perchis et trois futaies)

Dans chaque placette complémentaire de 1/25 ha, neuf cellules de compétition dont l'arbre central était un érable à sucre ont été choisies en fonction de la distribution de la position sociale de l'érable à sucre dans le peuplement et délimitées selon le protocole de Schütz (1989 - figure 6). La longueur, la hauteur à la base et à l'apex et les dix dernières élongations du bourgeon apical de chaque branche dans la direction des voisins de premier ordre ont été mesurées sur tous les arbres des cellules de compétition (figure A1). La projection des cimes de tous les arbres a également été faite (figure A2). Tous les arbres centraux et les arbres voisins autres que l'érable à sucre ont été abattus en vue de les soumettre à l'analyse de tige, selon un protocole plus intensif pour les arbres dominants que pour les dominés. Des rondelles ont également été prélevées à la base de la couronne, en vue d'y mesurer la surface d'aubier. Sur chaque arbre central abattu, la longueur totale, la hauteur à la base et à l'apex et les dix dernières unités de croissance ont été mesurés sur toutes les branches situées dans l'axe d'une seule des branches déjà mesurée précédemment (figure A3). Le diamètre à hauteur de poitrine, l'espèce et la classe de qualité ont été mesurés sur tous les arbres de la placette de 1/25 ha, selon les normes en vigueur (M.E.R. 1984) pour permettre de relier les deux méthodes d'échantillonnage. Toute la placette a également été cartographiée. Un relevé écologique a été effectué dans chaque placette, suivant le protocole défini par le M.R.N (Saucier 1994).

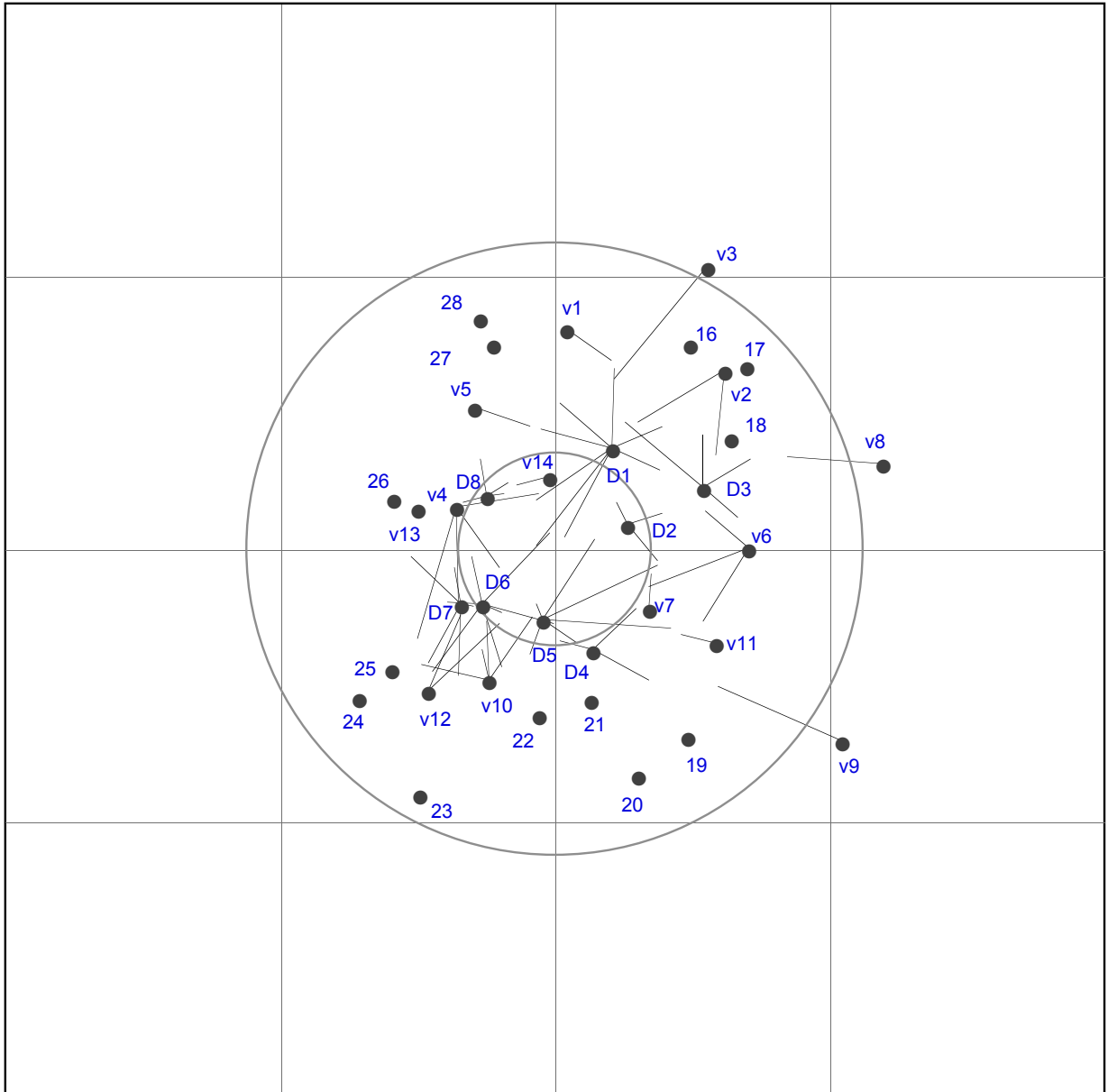


Figure A1 : Mesure dans les cellules de compétition des branches en direction des voisins en compétition. Exemple de la placette complémentaire D.

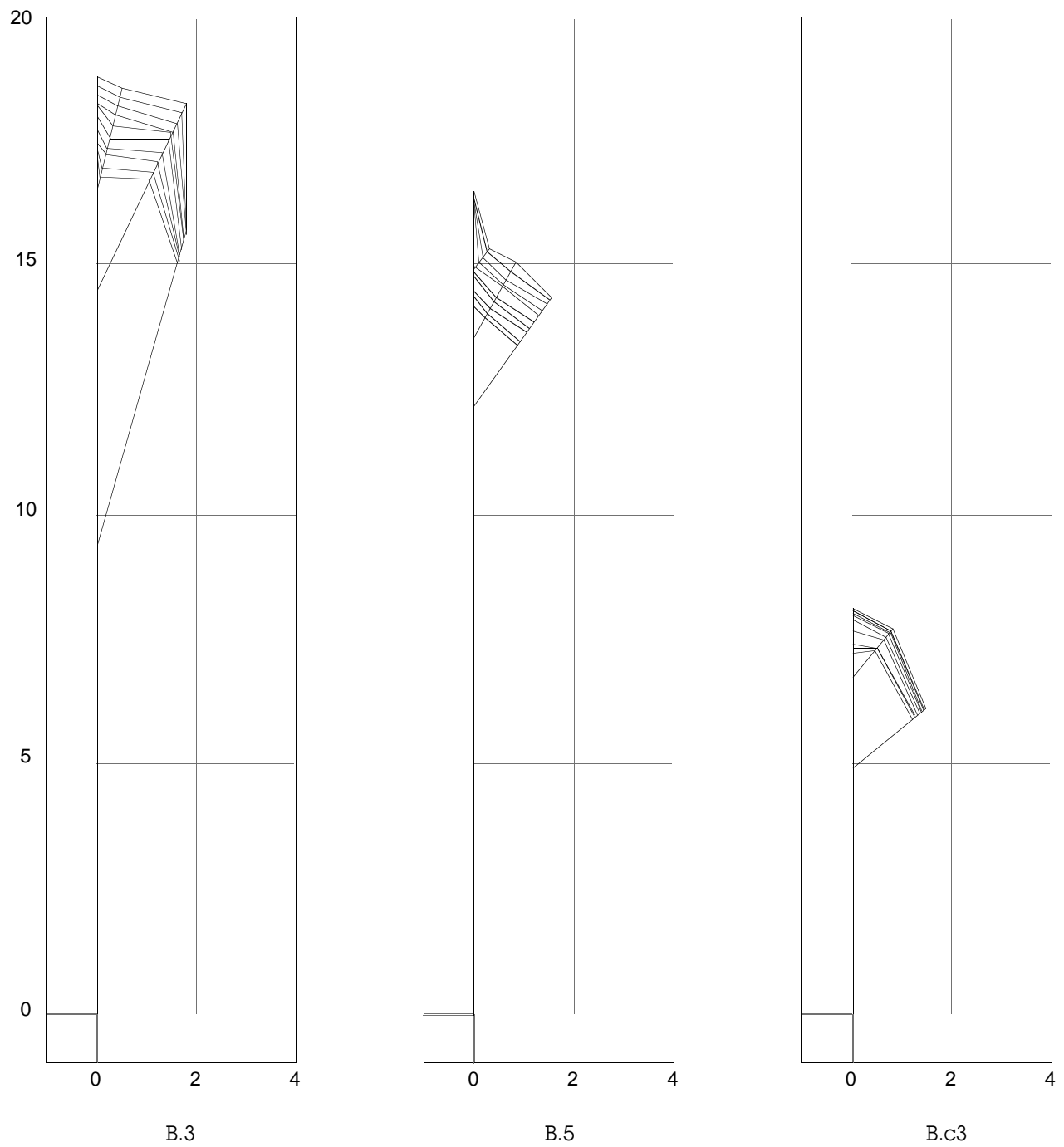


Figure A2: Exemple de représentation des 10 derniers accroissements en longueur des branches d'ordre 2 d'érables à sucre d'étages différents. Placette B (diamètre moyen de 13.1 cm, hauteur moyenne de 17.5 m).

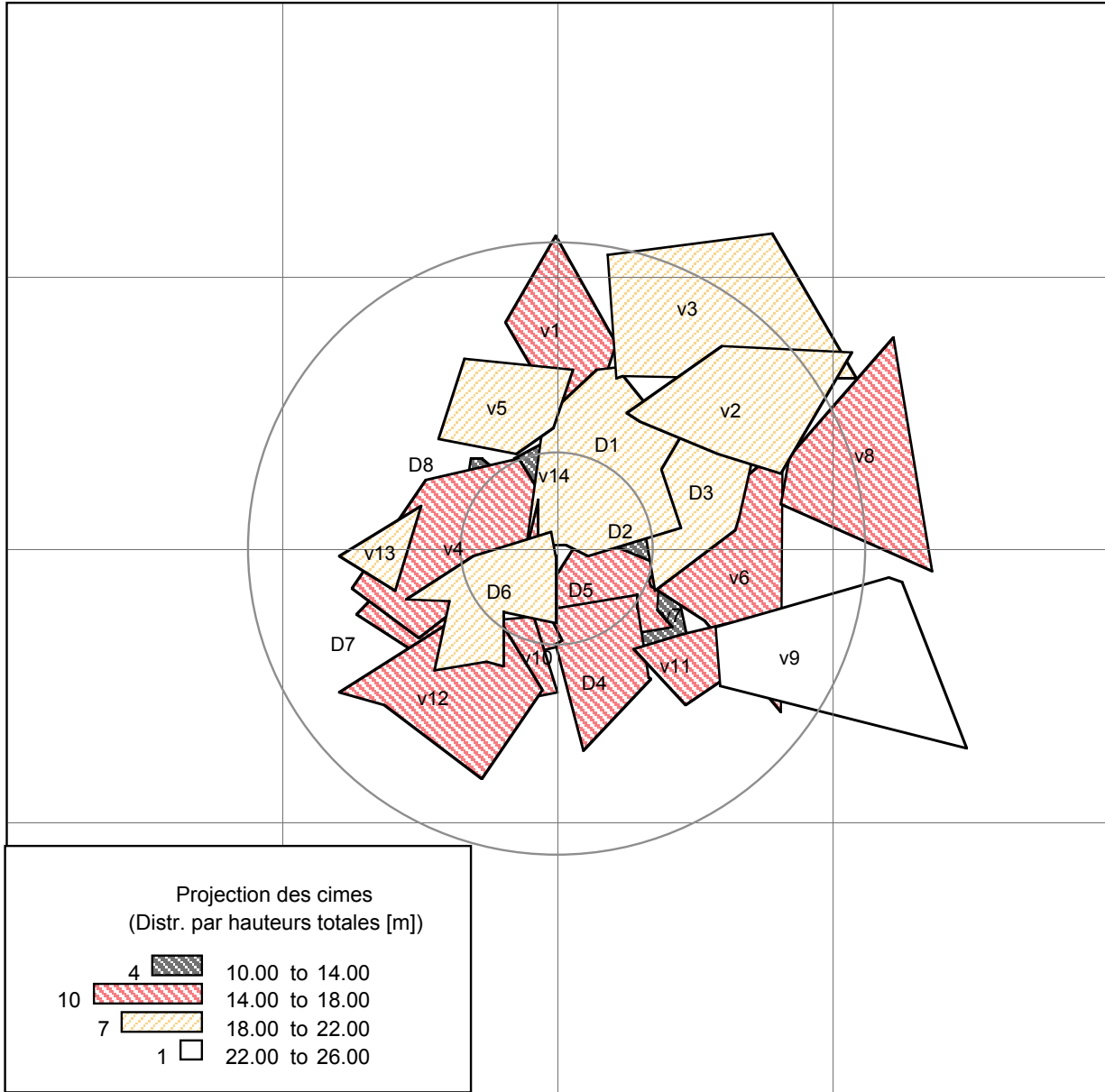


Figure A3: Vue aérienne de la projection des cimes des arbres inclus dans les cellules de compétition. Exemple de la placette complémentaire D.