



Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue

ÉTUDE DE LA COMPÉTITION ENTRE LE PEUPLIER FAUX- TREMBLE ET LE BOULEAU À PAPIER DANS DE JEUNES PEUPLEMENTS DE FEUILLUS INTOLÉRANTS

Rapport produit et rédigé par :

Frédéric Doyon, ing. f., Ph. D.
Pascale Sabbagh, Ing. agr.
Philippe Nolet, M. Sc.

Présenté à :

Kenny Walsh, ing. f.
U.G. 042 (La Tuque)

Stéphane Nolet, tech.. f.
Les Industries John Lewis Ltée.

Québec 
Ministère des
Ressources naturelles



Juin 2001

Remerciements

Nous voulons en premier lieu remercier Fabien Côté et Martin Poirier pour leur travail impeccable sur le terrain lors de la prise des données. La préparation et la lecture des disques ont été effectuées par Martin Poirier alors que Régis Pouliot a mené les analyses de tiges. Nous tenons à témoigner notre reconnaissance à Stéphane Nolet et Damien Allard pour leur participation enthousiaste à ce projet. Ce projet de suivi a été réalisé grâce au Programme de Mise en Valeur du Milieu Forestier (Volet I) du Ministère des ressources naturelles (U. G. La Tuque) en association avec John Lewis Ltée.

Résumé

Étude de la compétition entre le bouleau à papier et le peuplier faux-tremble dans de jeunes peuplements de feuillus intolérants

Frédéric Doyon¹, Philippe Nolet¹ et Pascale Sabbagh¹

¹IQAFF, 88, rue Principale, Saint-André-Avellin, Québec, J0V 1W0

Cette étude visait à caractériser la compétition exercée par le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) sur le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) dans de jeunes peuplements issus de coupe avec protection de la régénération et des sols. Il s'agissait notamment de mieux situer dans le temps le début de l'oppression du bouleau et de déterminer l'environnement de croissance permettant de maintenir des bouleaux de qualité dans le peuplement, ainsi que de fournir un critère permettant de juger de la nécessité d'un dégagement. Grâce à des analyses dendrochronologiques, on a reconstitué l'historique de croissance en hauteur et en diamètre sur 20 ans de 72 paires de tiges, chaque paire étant composée d'une tige de bouleau et d'une tige de peuplier compétitrice, dans des peuplements de feuillus intolérants dominés par le peuplier issus de coupe totale en Haute-Mauricie. L'accroissement moyen en hauteur était de 41 cm par an (écart-type de 9,3 cm) pour le bouleau et de 51 cm par an (écart-type de 7,3 cm) pour le peuplier. 90 % des tiges de bouleau montraient un ralentissement de leur croissance en hauteur vers l'âge de 12 ans. Cet essoufflement du bouleau était favorable au peuplier, dont la croissance en hauteur s'accélérait après un délai de réponse de trois ans. La densité n'était que faiblement corrélée avec la croissance en hauteur du bouleau et l'accroissement de l'écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier après 12 ans ; par ailleurs, au sein de la gamme de valeurs observées (1600 à 16900 tiges par hectare), la densité n'avait pas d'effet sur la formation de branches. Plusieurs variables d'environnement de croissance caractérisant la position d'une tige de bouleau par rapport aux tiges la compétitionnant étaient corrélées avec la croissance en hauteur du bouleau après 12 ans. Le ratio hauteur/diamètre à hauteur de poitrine (h/dhp) était un bon prédicteur de l'accroissement en hauteur du bouleau après 12 ans. Ce ratio constituait en outre un bon indicateur du degré de compétition subi par les tiges de bouleau ; ainsi, un ratio h/dhp d'environ 1,3 définissait un seuil au delà duquel les tiges

de bouleau perdaient tout avantage compétitif vis-à-vis du peuplier. Cette étude a montré que la croissance en hauteur du bouleau à papier dépend davantage de la hiérarchisation sociale en hauteur que de la densité du peuplement. Le ratio h/dhp pourrait avantageusement remplacer le critère densité pour juger de la nécessité d'une éclaircie pré-commerciale dans un peuplement.

Tables des matières

Remerciements	ii
Résumé	iii
Tables des matières.....	v
Liste des tableaux	vii
Introduction.....	1
Méthodologie	3
Travaux sur le terrain	3
1 Dispositif et choix des tiges	3
2 Protocole de mesures.....	4
3 Récolte des échantillons.....	4
Travaux en laboratoire	5
1 Préparation des échantillons	5
2 Lecture des largeur de cernes sur les disques.....	5
3 Analyse des tiges.....	6
Traitement des données.....	7
1 Préparation des données.....	7
2 Analyses	8
Résultats	11
Accroissements en hauteur annuels.....	11
Patrons de croissance et de compétition entre le bouleau et le peuplier.....	11
Identification de l'âge auquel débute le ralentissement de croissance chez le bouleau	13
Facteurs expliquant le ralentissement de la croissance en hauteur du bouleau après 12 ans.....	16
1 Variables d'environnement de croissance.....	16
2 Variables morphométriques	17
Accroissement de l'écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier après 12 ans	20
1 Variables d'environnement de croissance.....	20
2 Variables morphométriques	20
Lien entre le ratio h/dhp, la position sociale et la compétition.....	21
Analyse de la branchaison.....	22

Discussion.....	23
Recommandations	28
Conclusion.....	32
Références citées	33
Annexe 1.....	35
Annexe 2.....	45

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des peuplements échantillonnés	4
Tableau 2. Moyennes des accroissements annuels avant et après 12 ans pour l'ensemble des bouleaux, les bouleaux dominants/codominants, les bouleaux intermédiaires/dominés et les peupliers	15
Tableau 3. Répartition des tiges-sujets de bouleau en fonction de leur statut (dominant/codominant ou intermédiaire/dominé) et de leur avantage compétitif par rapport à la tige-compétition de peuplier associée	16
Tableau 4. Coefficients de corrélation de Pearson entre l'accroissement en hauteur du bouleau après 12 ans, l'accroissement de l'écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier après 12 ans et les variables morphométriques et d'environnement de croissance	17
Tableau 5. Risques d'erreur dans la prédiction d'une croissance du bouleau après 12 ans supérieure ou inférieure à 0,35 m/an (a) et à 0,40 m/an (b) en utilisant l'équation 1.....	20
Tableau 6. Statistiques descriptives pour la hauteur sans branche vivante et le ratio hauteur sans branche vivante/hauteur totale pour les individus intermédiaires/dominés et dominants/codominants en 2000	22
Tableau 7. Résultats du test de Student entre la hauteur sans branche vivante moyenne pour les bouleaux dominants/codominants et les bouleaux intermédiaires/dominés	22

Liste des figures

Figure 1.	Photographie d'un disque avec repérage des quatre rayons utilisés pour l'analyse dendrochronologique.	5
Figure 2.	Exemple de croissance en hauteur et en diamètre d'une tige de bouleau de 1977 (cône le plus petit) à 2000 (cône le plus grand).	6
Figure 3.	Comparaison des accroissements en hauteur moyens annuels entre le bouleau et le peuplier.	11
Figure 4.	Exemple de courbes de croissance en hauteur d'une paire tige-sujet de bouleau/tige-compétition de peuplier correspondant au cas "bouleau maintenu".	12
Figure 5.	Exemple de courbes de croissance en hauteur d'une paire tige-sujet de bouleau/tige-compétition de peuplier correspondant au cas "bouleau opprimé".	12
Figure 6.	Exemple de courbes de croissance en hauteur d'une paire tige-sujet de bouleau/tige-compétition de peuplier correspondant au cas "bouleau vainqueur".	13
Figure 7.	Exemple de courbes de croissance en hauteur d'une paire tige-sujet de bouleau/tige-compétition de peuplier correspondant au cas "bouleau perdant".	13
Figure 8.	Evolution de la hauteur des bouleaux dominants/codominants, des bouleaux intermédiaires/dominés et du peuplier en fonction de l'âge. Pour faciliter la lecture, l'effet arbre a été ramené à l'effet de l'arbre moyen afin de représenter la rupture de croissance à 12 ans, abstraction faite des différences entre les tiges.	14
Figure 9.	Relation entre l'accroissement en hauteur du bouleau sur la période allant de 12 à l'âge actuel de la tige et le ratio h/dhp à 12 ans.	18
Figure 10.	Résidus du modèle de régression linéaire mettant en relation l'accroissement en hauteur du bouleau sur la période allant de 12 à 25 ans et le ratio h/dhp à 12 ans.	19
Figure 11.	Relations entre le ratio h/dhp, les indices de compétition en diamètre et en hauteur et la position sociale en 2000.	21
Figure 12.	Diagramme décisionnel indiquant dans quels cas effectuer un dégagement lorsque la croissance-objectif du bouleau après 12 ans est égale à 35 cm/an (sylviculture extensive) ou 40 cm/an (sylviculture intensive).	30

Introduction

Le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) est une essence de plus en plus prisée par l'industrie du sciage et du déroulage au Québec et de plus en plus demandée sur les marchés internationaux pour la fabrication de meubles et de pièces de décoration intérieure. Cette essence peut aussi être déroulée pour la fabrication de produits découpés tels les bâtonnets, les abaisse-langues médicales et les bâtons pour mélanger la peinture. C'est ce type de produits que fabriquent les Industries John Lewis Ltée, qui utilisent exclusivement le bouleau blanc en raison de sa couleur, de sa rigidité et de sa neutralité de goût et d'odeur. Ainsi, une sylviculture favorisant la production de belles tiges de cette essence est de mise pour assurer l'approvisionnement des industries fabricant de tels produits à forte valeur ajoutée. Favoriser la régénération du bouleau à papier et mener cette régénération au stade de perchis constitue donc un objectif prioritaire.

L'un des principaux facteurs influençant l'établissement et la croissance des semis de bouleau à papier est la présence de végétation concurrente, notamment de jeunes tiges de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) (Safford *et al.*, 1990). Suite à une coupe avec protection de la régénération et des sols, on assiste à l'établissement d'un nouveau peuplement de feuillus intolérants principalement composé de peuplier faux-tremble et de bouleau à papier, type de peuplement qui occupe des superficies considérables en Haute-Mauricie. Durant les stades juvéniles de leur développement, ces deux espèces de lumière à croissance rapide se livrent une compétition très serrée pour la domination de la strate supérieure. À partir d'un certain moment, le bouleau à papier perd sa compétitivité par rapport au peuplier faux-tremble et sa présence au sein de la cohorte de tiges dominantes diminue. L'éclaircie pré-commerciale dans de tels peuplements vise à assurer le maintien des tiges d'avenir de bouleau à papier dans l'étage dominant. En effet, selon Godman et Marquis (1969), les éclaircies pré-commerciales sont nécessaires lorsque les tiges de bouleau à papier sont opprimées par des tiges d'espèces à croissance plus rapide ou lorsque la densité du peuplement le justifie. LaBonte et Nash (1978) et LaBonte et Leso (1990) ont démontré la nécessité de dégager le bouleau à papier lorsque celui-ci est accompagné de peuplier faux-tremble,

faute de quoi le bouleau voit sa place réduite à une composante très mineure du peuplement. LaBonte et Nash (1978) ont également noté que les dégagements ont un effet immédiat sur la croissance en diamètre des tiges d'avenir, et ce durant cinq ans.

Si la majorité des sylviculteurs préconisent un traitement avant le stade de perchis, la littérature contient relativement peu d'indications précises concernant le moment où le sylviculteur doit intervenir, en fonction de la composition et de la densité du peuplement. LaBonte et Nash (1978) et Marquis *et al.* (1969) mentionnent que, lorsque le peuplement est envahi par des essences à croissance rapide comme le peuplier faux-tremble, la période de dégagement optimale pour le bouleau à papier se situe entre 5 et 10 ans. Safford (1983) préconise de réaliser le nettoyage le plus tôt possible, avant que les bouleaux ne soient opprimés et lorsque le nombre d'individus entre lesquels choisir les tiges d'avenir est maximal. L'intensité avec laquelle l'éclaircie pré-commerciale doit être effectuée pour assurer le maintien du bouleau à papier au sein de la cohorte d'avenir varie avec les auteurs. Lamson et Smiths (1987) recommandent une surface terrière résiduelle de 50 à 60 %. Au Québec, le nombre de tiges éclaircies proposé par le Manuel d'Aménagement est compris entre 250 et 375 tiges d'avenir par hectare, ce qui correspond aux valeurs présentées par Safford (1983) et LaBonte et Nash (1978).

Cette étude a été menée afin de répondre aux objectifs suivants :

- ❑ Identifier l'âge auquel le bouleau à papier perd son avantage compétitif face au peuplier faux-tremble.
- ❑ Déterminer l'environnement de croissance permettant de maintenir des bouleaux de qualité dans le peuplement :
Cet objectif se décompose en deux aspects : d'une part déterminer le seuil de compétition maximal que le bouleau peut supporter sans compromettre sa croissance en hauteur, d'autre part identifier un éventuel seuil de dégagement à ne pas dépasser pour limiter la formation de branches.
- ❑ Développer un indicateur simple d'utilisation permettant un diagnostic des peuplements sur le terrain et l'identification du seuil d'opportunité de traitement.

Méthodologie

Travaux sur le terrain

1 Dispositif et choix des tiges

L'étude s'est déroulée en Haute-Mauricie (feuillelet cartographique 31P9NE), dans des peuplements âgés d'environ 20 ans, issus de coupes totales datant de 1978 à 1981. Toutes les mesures ont été prises au cours de l'été 2000. Ces peuplements croissaient sur des dépôts constitués de tills moyens à épais et le drainage y était de type mésique. Des individus de bouleau à papier et de peuplier faux-tremble ont été récoltés dans six strates qui différaient légèrement par leurs caractéristiques de peuplements (Tableau 1). Tous les peuplements étaient composés d'une forte proportion de feuillus intolérants dominés par le peuplier. Un, deux ou trois peuplement(s) par strate ont été sélectionnés selon les cas, avec un total de 12 peuplements (Tableau 1). Dans chaque peuplement, six individus de bouleau à papier ont été choisis comme tiges-sujet, dont 3 de statut dominant ou co-dominant (hauteur supérieure à $h_{moy} + \sigma$, où h_{moy} est la hauteur moyenne des tiges-compétition et σ l'écart-type) et 3 de statut intermédiaire ou dominé (hauteur inférieure à $h_{moy} - \sigma$). Toutes les tiges dont la cime était en contact avec celle de la tige-sujet ont été considérées comme tiges-compétition. Pour chaque tige-sujet, une tige-compétition de statut dominant ou co-dominant dont la cime était adjacente à celle de la tige-sujet a été sélectionnée, en choisissant préférentiellement les peupliers (un bouleau n'ayant été choisi comme tige-compétition que dans quatre cas en raison de l'absence de peupliers autour de la tige-sujet).

Tableau 1. Caractéristiques des peuplements échantillonnés

Numéro de peuplement	Composition*	Classe de hauteur	Classe de densité	Année de coupe
1	M	5	B	1978
2	F	5	B	1981
3	F	5	B	1981
4	M	5	B	1978
5	MPeBbR	4	B	1980
6	MPeBbR	4	B	1980
7	F	5	A	1981
8	FPeBb	4	A	1979
9	M	5	C	1979
10	MBbPg	4	A	1981
11	MPeBbR	4	B	1980
12	F	5	B	1978

* M = mixte, F = feuillus, R = résineux, Pe = peuplier, Bb = bouleau à papier, Pb = pin gris (*Pinus banksiana*)

2 Protocole de mesures

Pour toutes les tiges-compétition, l'espèce, le diamètre à hauteur de poitrine, la hauteur et la distance à la tige-sujet ont été notés. Le diamètre à hauteur de poitrine a été mesuré à l'aide d'un compas forestier avec une précision de 1 mm. La hauteur a été estimée à l'aide d'un clinomètre avec une précision de 0,1 m. La distance à la tige-sujet a été mesurée à hauteur de poitrine d'écorce à écorce avec une précision de 1 cm. Pour la tige-sujet et la tige-compétition sélectionnée, on a mesuré la hauteur totale (distance entre le sommet de la cime et le pied de l'arbre) et la longueur de tige sans branche vivante après abattage. La hauteur totale et la longueur de tige sans branche vivante ont été mesurées au ruban avec une précision de 1 cm.

3 Récolte des échantillons

Un disque transversal a été prélevé tous les 1,5 m (en partant du niveau le plus bas mesuré sur le terrain) sur chaque tige-sujet et chaque tige-compétition sélectionnée, le premier disque étant prélevé à 10 cm du sol. Chaque disque a ensuite été identifié par le numéro de peuplement, le numéro de tige et la hauteur de prélèvement correspondants.

Travaux en laboratoire

1 Préparation des échantillons

La préparation des disques a débuté par un séchage à l'air. Les disques ont ensuite été soumis à des sablages successifs avec du papier abrasif de grain croissant variant de 80 à 400 grains/po².

2 Lecture des largeur de cernes sur les disques

Le premier axe a été choisi de façon aléatoire (en évitant cependant les zones déformées par des branches éventuelles) et le deuxième axe a été fixé perpendiculairement au premier. L'analyse dendrochronologique a été faite sur les quatre rayons résultants, permettant une validation croisée des cernes de croissance sur les quatre rayons. Pour ce faire, les disques ont été numérisés à 472 pixels par cm et les distances entre les cernes ont été mesurées à l'aide d'ArcView après numérisation des intersections entre les cernes et les axes (Figure 1).

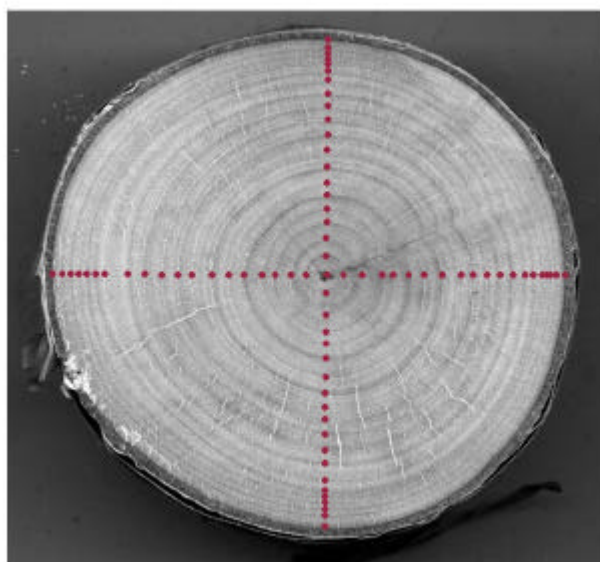


Figure 1. Photographie d'un disque avec repérage des quatre rayons utilisés pour l'analyse dendrochronologique.

Les points rouges représentent les points d'intersection entre les cernes et les axes.

3 Analyse des tiges

La hauteur et le diamètre des 72 tiges de bouleau ont été déterminés pour chaque année par interpolation (Figure 2).

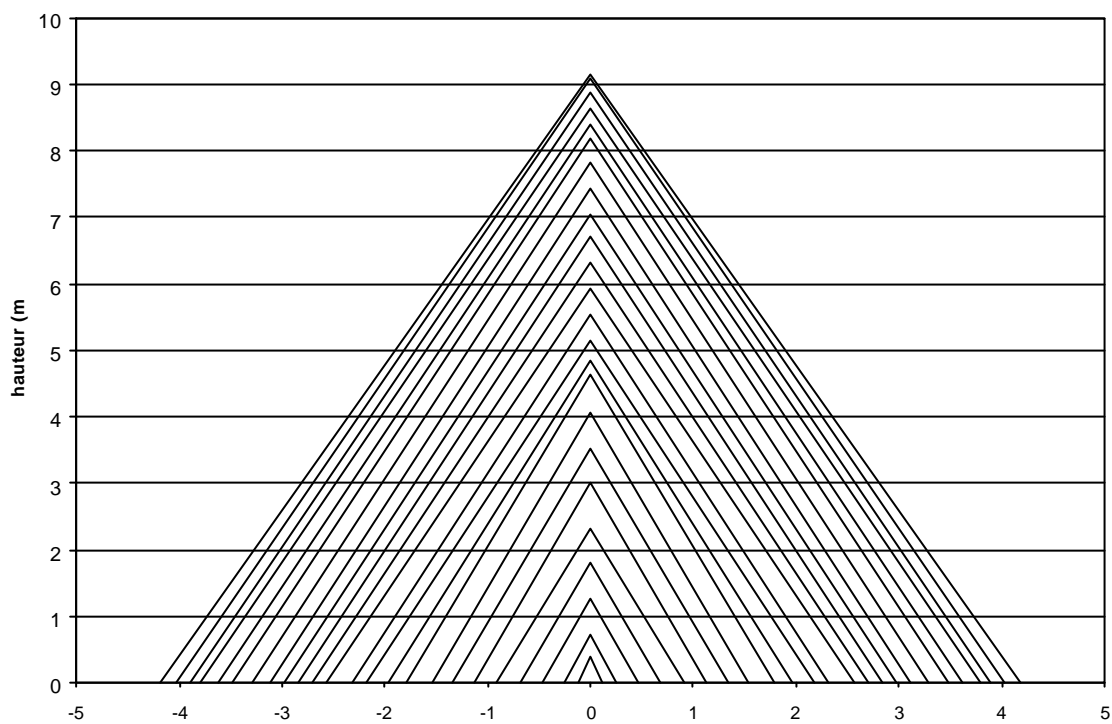


Figure 2. Exemple de croissance en hauteur et en diamètre d'une tige de bouleau de 1977 (cône le plus petit) à 2000 (cône le plus grand).

Traitement des données

1 Préparation des données

L'âge de chaque tige-sujet de bouleau et de chaque tige-compétition de peuplier a été déterminé en utilisant l'année de la coupe et l'année correspondant au premier cerne mesuré : il a été choisi égal à l'âge du premier cerne lorsque celui-ci était antérieur à l'âge de la coupe et égal à l'âge de la coupe sinon. On a ainsi pu obtenir la hauteur de chaque tige à l'âge de 12 ans à partir des mesures de cernes¹.

Le ratio hauteur/diamètre à hauteur de poitrine (h/dhp) a été calculé d'une part en 2000 et d'autre part à l'âge de 12 ans. Le calcul du ratio h/dhp à 12 ans a été fait en utilisant le rayon du deuxième disque, prélevé à hauteur de poitrine, en utilisant la formule suivante : $dhp_{15ans} = 2 \times \text{rayon}_{\text{disque2}} + \text{épaisseur moyenne de l'écorce}$. L'épaisseur de l'écorce a été calculée en faisant la différence entre le diamètre du dernier cerne de croissance prélevé au niveau 2 et le diamètre à hauteur de poitrine externe mesuré au compas.

Un indice reflétant le statut d'une tige par rapport à ses compétitrices a été calculé pour les tiges-sujets et les tiges-compétition. Il s'agit de la variable "position sociale", égale à la différence entre la hauteur d'une tige et la hauteur moyenne de l'ensemble des tiges en compétition, divisée par l'écart-type. Cette variable, calculée pour l'année 2000, est positive pour les bouleaux dominants/codominants et négative pour les bouleaux intermédiaires/dominés.

En outre, des indices de compétition ont été calculés de la façon suivante pour l'année 2000, selon l'approche décrite par Hix (1983) :

- Indice de compétition en diamètre : $IC_dhp = \sum_{i=1}^n dhp_{comp\ i} / (dhp_{sujet} * dist_i)$

¹ L'âge d'une tige-sujet de bouleau et de la tige-compétition de peuplier correspondante n'étaient pas toujours indentiques. Dans la suite, l'expression "après 12 ans" sera utilisée pour signifier "lorsque le bouleau a atteint un âge supérieur à 12 ans".

- Indice de compétition en hauteur : $IC_h = \sum_{i=1}^n h_{comp\ i} / (h_{sujet} * dist_i)$

La densité (exprimée en nombre de tiges par hectare) a été obtenue par la formule $densité = 10^4 / (distMoyenne)^2$, où $distMoyenne$ est la moyenne des distances entre la tige-sujet et chacune des tiges de compétition correspondantes (Smith, 1980). De plus, pour chaque paire tige-sujet de bouleau/tige-compétition de peuplier, on a calculé la différence de hauteur $h_{bop} - h_{pet}$ existant l'année de l'établissement du bouleau. Enfin, les deux variables utilisées pour caractériser la qualité de la tige ont été la hauteur sans branche vivante et le ratio hauteur sans branche vivante/hauteur totale (hsb/h_{tot}) calculés en 2000.

2 Analyses

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel SPSS 8.0 pour Windows. Dans tous les tests utilisés, le seuil statistique a été fixé à 0,05.

2.1 Croissance en hauteur moyenne du bouleau et du peuplier

Les accroissements annuels en hauteur moyens, calculés en divisant la hauteur mesurée en 2000 par l'âge, ont été comparés entre le bouleau et le peuplier à l'aide d'un test de Student.

2.2 Analyse de la croissance en hauteur du bouleau

Une analyse de covariance de la hauteur du bouleau à papier en fonction de l'âge a été effectuée afin de repérer un éventuel changement significatif dans la croissance du bouleau au cours du temps. Plusieurs âges, allant de 10 à 17 ans, ont été testés comme limite possible entre deux périodes de croissance différentes. La ségrégation la plus significative, qui conduisait à la différence de pente la plus élevée entre les deux droites de régression correspondant aux deux périodes de croissance, a permis de déterminer l'âge auquel l'essoufflement commençait à se manifester. Le modèle testait les effets de l'arbre, de l'âge, de la ségrégation, des interactions deux à deux arbre*âge, arbre*ségrégation et âge*ségrégation ainsi que de la triple interaction arbre*âge*ségrégation.

Des régressions linéaires mettant en relation la hauteur et l'âge après 12 ans ont alors été modélisées pour chaque tige de bouleau. Le choix de la période "12 ans et plus" correspondait au début de l'essoufflement signalé par l'analyse de covariance. La pente de la droite de régression nous donnait l'accroissement en hauteur du bouleau sur la période postérieure à 12 ans.

2.3 Analyse de la croissance en hauteur du peuplier

Il s'agissait de déterminer si le ralentissement de la croissance en hauteur du bouleau à 12 ans, mis en évidence par l'analyse de covariance précédente, était accompagné d'un changement dans la croissance du peuplier. Le modèle de covariance testé était le même que pour l'analyse de covariance réalisée pour le bouleau, avec l'âge de ségrégation fixé à 12 ans. On a également testé ce modèle de covariance avec l'âge de ségrégation fixé à 15 ans.

2.4 Analyse de l'écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier

De façon similaire à l'analyse de la croissance du bouleau, des régressions linéaires ont été modélisées pour chaque tige-sujet, mettant cette fois en relation la différence de hauteur $h_{\text{bop}} - h_{\text{pet}}$ et l'âge du bouleau sur la période postérieure à 12 ans. La pente de la droite de régression correspondait à l'accroissement de l'écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier sur la période postérieure à 12 ans.

2.5 Corrélations entre l'accroissement en hauteur du bouleau et l'accroissement de l'écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier après 12 ans et les variables morphométriques et d'environnement de croissance

L'accroissement en hauteur du bouleau après 12 ans et l'accroissement de l'écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier après 12 ans ont été mis en relation avec des variables morphométriques du bouleau à papier et des variables d'environnement de croissance. On a recherché les corrélations existant avec les variables calculées à 12 ans (ratio h/dhp , hauteur du bouleau, écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier) et celles calculées en 2000 (hauteur du bouleau, ratio h/dhp , position sociale, indices de compétition, densité) ainsi que l'écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier à l'établissement.

On a développé un modèle de régression linéaire de l'accroissement en hauteur du bouleau après 12 ans en fonction du ratio h/dhp à 12 ans, puis on a effectué une analyse des résidus de ce modèle.

2.6 Relation entre le ratio h/dhp , la position sociale et les indices de compétition

La relation entre le ratio h/dhp , la position sociale et les deux indices de compétition a été testée à l'aide de la régression linéaire.

2.7 Formation de branches

Les corrélations entre les deux variables de branchaison et les autres variables, notamment la densité, ont été calculées. La différence entre les moyennes des hauteurs sans branche vivante et des ratios hauteur sans branche vivante/hauteur totale pour les individus intermédiaires/dominés et dominants/codominants a été testée à l'aide d'un test de Student.

Résultats

Accroissements en hauteur annuels

La moyenne des accroissements en hauteur moyens est de 41,4 cm/an (écart-type de 9,3 cm) pour le bouleau et de 50,8 cm/an (écart-type de 7,3 cm) pour le peuplier. Les résultats du test de Student montrent que les accroissements annuels sont significativement différents pour le bouleau et le peuplier ($p < 0,001$). Le bouleau s'accroît en moyenne de 9,4 cm de moins par an que le peuplier (Figure 3).

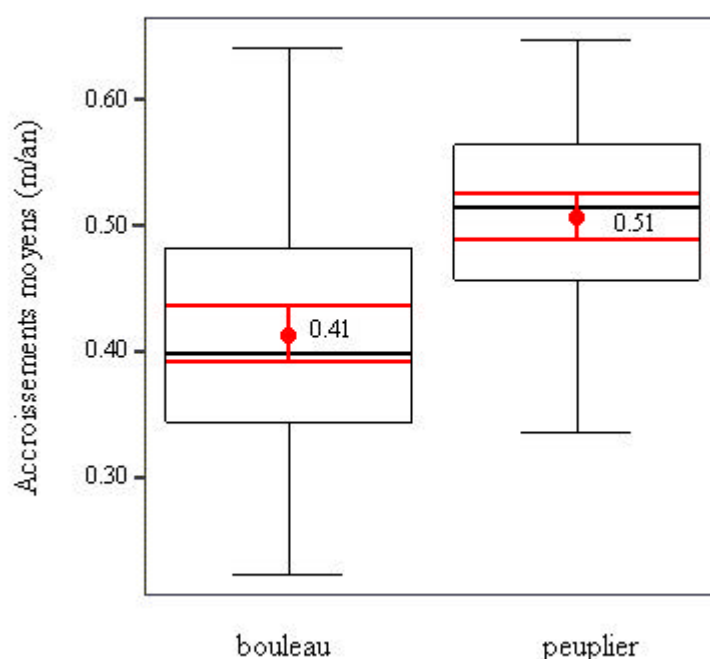


Figure 3. Comparaison des accroissements en hauteur moyens annuels entre le bouleau et le peuplier.

La boîte contient 50% des valeurs. La ligne horizontale noire traversant la boîte représente la médiane. Les lignes verticales qui partent de la boîte vers le bas et vers le haut atteignent les valeurs extrêmes. Le rond rouge représente la moyenne et la portion comprise entre les traits rouges correspond à 95 % de l'intervalle de confiance.

Patrons de croissance et de compétition entre le bouleau et le peuplier

À l'observation des graphiques de croissance en hauteur (Annexe 1), on distingue quatre patrons de croissance et de compétition entre le bouleau à papier et le peuplier.

- "Bouleau maintenu" : À l'établissement, le peuplier devance le bouleau. Néanmoins, aucun ralentissement de la croissance du bouleau n'est observé (Figure 4).

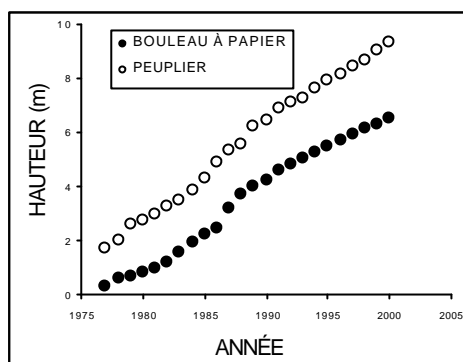


Figure 4. Exemple de courbes de croissance en hauteur d'une paire tige-sujet de bouleau/tige-compétition de peuplier correspondant au cas "bouleau maintenu".

- "Bouleau opprimé" : Il existe un décalage de hauteur initial en faveur du peuplier. Au début, la croissance du bouleau est parallèle à celle du peuplier, puis la croissance du bouleau ralentit alors que celle du peuplier se maintient ou augmente. L'issue de cette situation est l'oppression du bouleau (Figure 5).

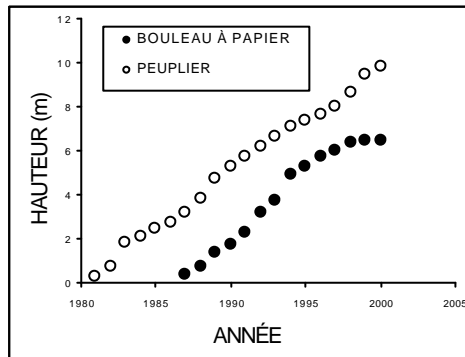


Figure 5. Exemple de courbes de croissance en hauteur d'une paire tige-sujet de bouleau/tige-compétition de peuplier correspondant au cas "bouleau opprimé".

- "Bouleau vainqueur" : La différence de hauteur initiale est inexistante ou en faveur du bouleau. Celui-ci, vainqueur de la compétition, se maintient ou supplante le peuplier (Figure 6).

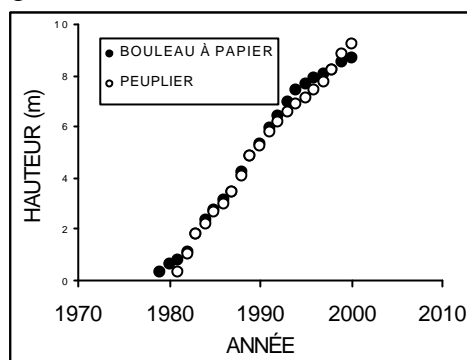


Figure 6. Exemple de courbes de croissance en hauteur d'une paire tige-sujet de bouleau/tige-compétition de peuplier correspondant au cas "bouleau vainqueur".

- "Bouleau perdant" : Il n'existe pas de différence de hauteur initiale entre le bouleau et le peuplier. Au bout d'un certain temps, le bouleau commence à perdre du terrain face au peuplier (Figure 7).

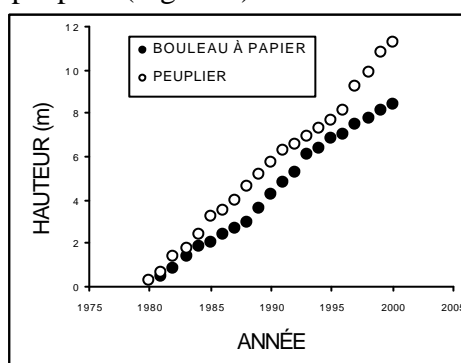


Figure 7. Exemple de courbes de croissance en hauteur d'une paire tige-sujet de bouleau/tige-compétition de peuplier correspondant au cas "bouleau perdant".

Identification de l'âge auquel débute le ralentissement de croissance chez le bouleau

Des modèles d'analyse de covariance significatifs ont été développés pour les bouleaux dominants et les bouleaux dominés, pour des âges de ségrégation allant de 10 à 17 ans. Dans tous les modèles où l'âge de ségrégation était inférieur ou égal à 15 ans, tous les effets (arbre, âge, ségrégation, arbre*âge, arbre*ségrégation, âge*ségrégation et

arbre*âge*ségrégation) étaient significatifs (Annexe 2a et b). Cependant, c'est pour le modèle basé sur l'âge de 12 ans que le terme d'interaction âge*ségrégation était le plus important, tant pour les bouleaux dominants/codominants (Annexe 2a) que pour les bouleaux intermédiaires/dominés (Annexe 2b), ce qui signifie que l'âge de 12 ans représente le moment critique où commence à se faire sentir le ralentissement de croissance en hauteur tant chez les bouleaux dominants que chez les bouleaux dominés. La pente passe de 0,56 m/an avant 12 ans à 0,40 m/an après 12 ans pour les bouleaux dominants/codominants et de 0,46 m/an avant 12 ans à 0,27 m/an pour les bouleaux intermédiaires/dominés (Figure 8).

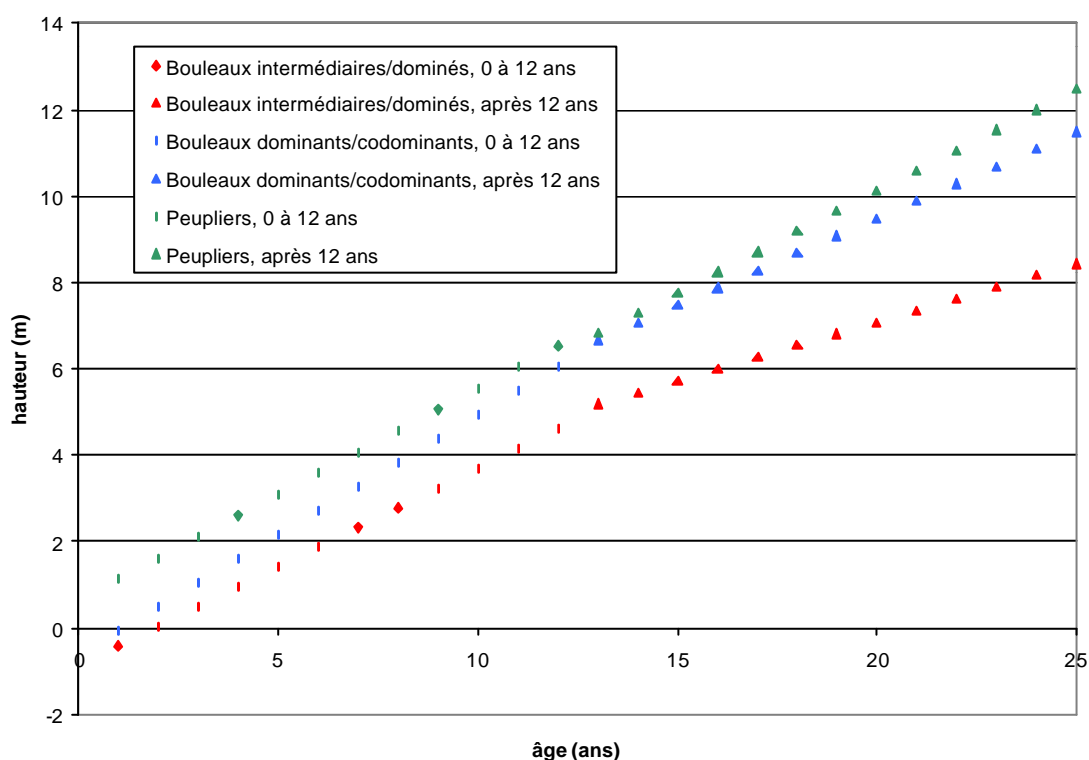


Figure 8. Evolution de la hauteur des bouleaux dominants/codominants, des bouleaux intermédiaires/dominés et du peuplier en fonction de l'âge. Pour faciliter la lecture, l'effet arbre a été ramené à l'effet de l'arbre moyen afin de représenter la rupture de croissance à 12 ans, abstraction faite des différences entre les tiges.

A titre de comparaison, l'analyse de covariance effectuée pour le peuplier avec un âge de ségrégation de 12 ans (Annexe 2c) permet de détecter un très léger ralentissement

dans la croissance du peuplier à l'âge de 12 ans, beaucoup moins important que celui observé chez le bouleau (Figure 8). En revanche, l'analyse de covariance effectuée pour le peuplier avec un âge de ségrégation de 15 ans (Annexe 2c) révèle une accélération de la croissance du peuplier à partir de 15 ans (la croissance passe de 0,48 m/an avant 15 ans à 0,53 m/an après 15 ans).

Le calcul des moyennes des accroissements en hauteur annuels avant et après 12 ans confirme l'existence d'un net ralentissement de la croissance en hauteur du bouleau à 12 ans. Ce ralentissement est un peu plus marqué chez les bouleaux intermédiaires/dominés que chez les bouleaux dominants/codominants (Tableau 2).

Tableau 2. Moyennes des accroissements annuels avant et après 12 ans pour l'ensemble des bouleaux, les bouleaux dominants/codominants, les bouleaux intermédiaires/dominés et les peupliers

		Tous bouleaux (n = 67)	Bouleaux dominants/ codominants (n = 35)	Bouleaux intermédiaires/ dominés (n = 32)	Peupliers (n = 67)
Moyenne des accroissements annuels (m/an)	0 à 12 ans	0,51	0,56	0,46	0,49
	Après 12 ans	0,34	0,39	0,27	0,49

Sur l'ensemble des bouleaux, 90,5 % subissent un ralentissement de leur croissance en hauteur à l'âge de 12 ans (correspondant aux cas des deux patrons d'essoufflement, "opprimé" et "perdant"). Le cas "bouleau opprimé", qui concerne 84,5 % des tiges de bouleau, est de loin le plus courant. Les deux cas de patrons compétitifs ("vainqueur" et "maintenu") totalisent 9,5 % des tiges. Le cas "bouleau vainqueur" est très rare puisqu'il ne concerne que 4,5 % de l'ensemble des tiges (Tableau 3).

Tableau 3. Répartition des tiges-sujets de bouleau en fonction de leur statut (dominant/codominant ou intermédiaire/dominé) et de leur avantage compétitif par rapport à la tige-compétition de peuplier associée

	Statut du bouleau*	"maintenu"	"opprimé"	"vainqueur"	"perdant"
Pourcentage de tiges	Dominant/ Codominant (n = 35)	6%	76%	6%	12%
	Intermédiaire/ Dominé (n = 32)	6%	91%	3%	0%

* les individus recensés comme subissant un ralentissement de croissance, c'est-à-dire les individus appartenant aux classes "opprimé" et "perdant", sont ceux pour lesquels la pente de la droite de régression de la hauteur en fonction de l'âge après 12 ans était inférieure à la pente de la droite de régression de la hauteur en fonction de l'âge sur la période allant de 0 à 12 ans.

Facteurs expliquant le ralentissement de la croissance en hauteur du bouleau après 12 ans

1 Variables d'environnement de croissance

La différence de hauteur à l'établissement n'est que faiblement corrélée avec l'accroissement en hauteur du bouleau après 12 ans ($r = 0,245$, Tableau 4). En revanche, cette différence de hauteur initiale est bien corrélée avec le ratio h/dhp à 12 ans ($r = -0,434$, $p < 0,001$) et la hauteur du bouleau à 12 ans ($r = 0,391$, $p = 0,001$). L'accroissement en hauteur du bouleau après 12 ans est beaucoup plus faiblement corrélé avec la variable densité ($r = -0,274$) qu'avec les autres variables d'environnement de croissance de l'année 2000, notamment la position sociale ($r = 0,620$) ainsi que les indices de compétition ($r = -0,513$ pour IC_dhp et $r = -0,461$ pour IC_h). Par ailleurs, l'accroissement en hauteur du bouleau après 12 ans est assez fortement corrélé avec la différence de hauteur $h_{bop} - h_{pet}$ à 12 ans ($r = 0,449$) (Tableau 4).

Tableau 4. Coefficients de corrélation de Pearson entre l'accroissement en hauteur du bouleau après 12 ans, l'accroissement de l'écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier après 12 ans et les variables morphométriques et d'environnement de croissance

Variable	Δh_{bop}	$\Delta(h_{\text{bop}}-h_{\text{pet}})$	Hauteur sans branche vivante	Ratio hsb/h _{ot}
Δh_{bop}			0,417**	-0,034
$\Delta(h_{\text{bop}}-h_{\text{pet}})$			0,262*	0,035
Position sociale	0,620**	0,524**	0,374**	-0,191
Ratio h/dhp	-0,481**	-0,406**	-0,357**	0,137
Variables en 2000				
IC_dhp	-0,513**	-0,499**	-0,392**	0,052
IC_h	-0,461**	-0,460**	-0,317**	0,004
Densité	-0,274*	0,138	-0,036	0,190
Ratio h/dhp	-0,529**	-0,303*	-0,298*	0,173
Variables à 12 ans				
h_{bop}	0,413**	0,156	0,522**	0,034
$h_{\text{bop}}-h_{\text{pet}}$	0,449**	0,291*	0,420**	-0,042
Écart de hauteur initial $(h_{\text{bop}}-h_{\text{pet}})_0$	0,245*	0,162	0,121	-0,168

* : corrélation significative à $p < 0,01$

** : corrélation significative à $p < 0,05$

2 Variables morphométriques

L'accroissement en hauteur du bouleau après 12 ans est assez fortement corrélé avec le ratio h/dhp en 2000 ($r = -0,481$, Tableau 4).

Parmi les variables calculées à 12 ans, le ratio h/dhp se révèle le meilleur indicateur du ralentissement de croissance qui frappe le bouleau à partir de 12 ans (Tableau 4, Figure 9). Un modèle de régression linéaire a été développé ($R^2 = 0,280$, $F = 24,874$, $p < 0,001$). Ce modèle exprime que plus une tige est élancée, moins son accroissement en hauteur subséquent sera élevé (Équation 1).

$$\text{Équation 1 : } \Delta h_{\text{après12ans}} = 0,580 - 0,152*(h/dhp)_{12}$$

où $\Delta h_{\text{après12ans}}$ désigne l'accroissement en hauteur du bouleau sur la période allant de 12 à l'âge actuelle de la tige.

La relation identifiée exprime 30% de la variance. Avec ce modèle, il est donc possible de déterminer quelle est la croissance en hauteur dont on est en droit de s'attendre selon la forme de la tige tel que déterminée par le ratio H/DHP. Ainsi, en sylviculture extensive, pour maintenir une croissance minimum de 35 cm/an, les tiges d'avenir devraient posséder un ratio H/DHP inférieur à 1,5. Pour une sylviculture plus intensive, avec une croissance en hauteur de 40 cm/an, le seuil s'abaisse à 1,2 (Figure 9). La répartition des résidus du modèle en fonction du ratio h/dhp est relativement homogène (Figure 10).

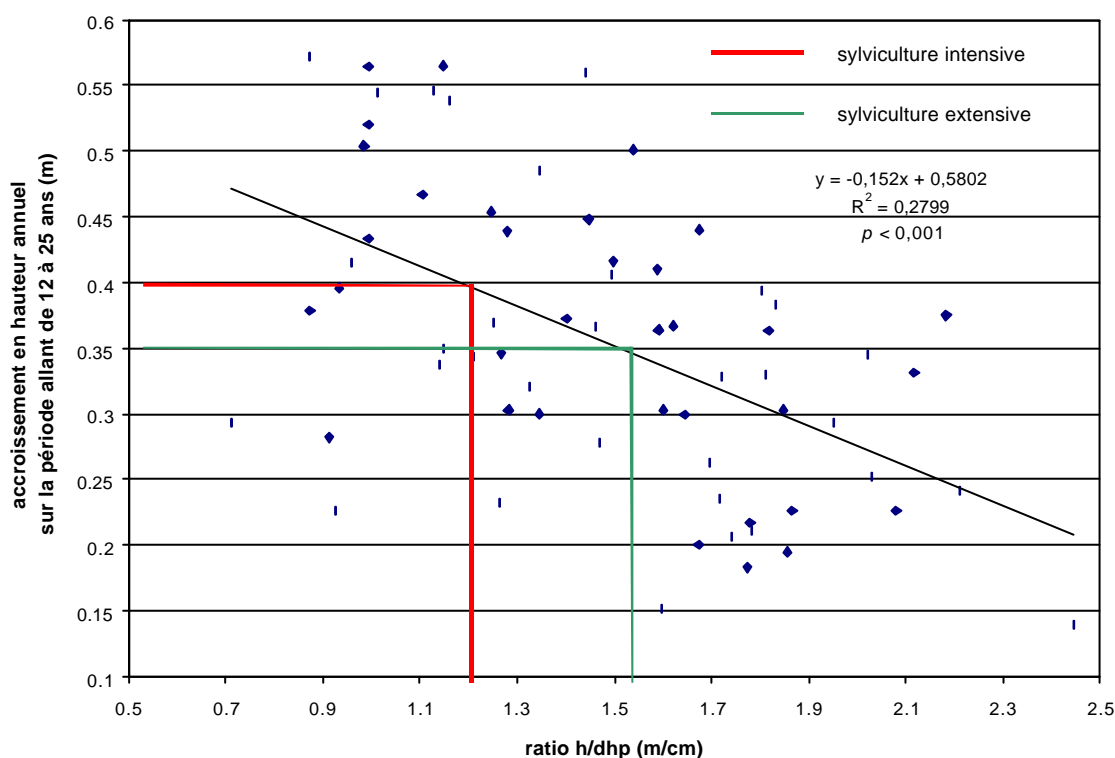


Figure 9. Relation entre l'accroissement en hauteur du bouleau sur la période allant de 12 à l'âge actuel de la tige et le ratio h/dhp à 12 ans.

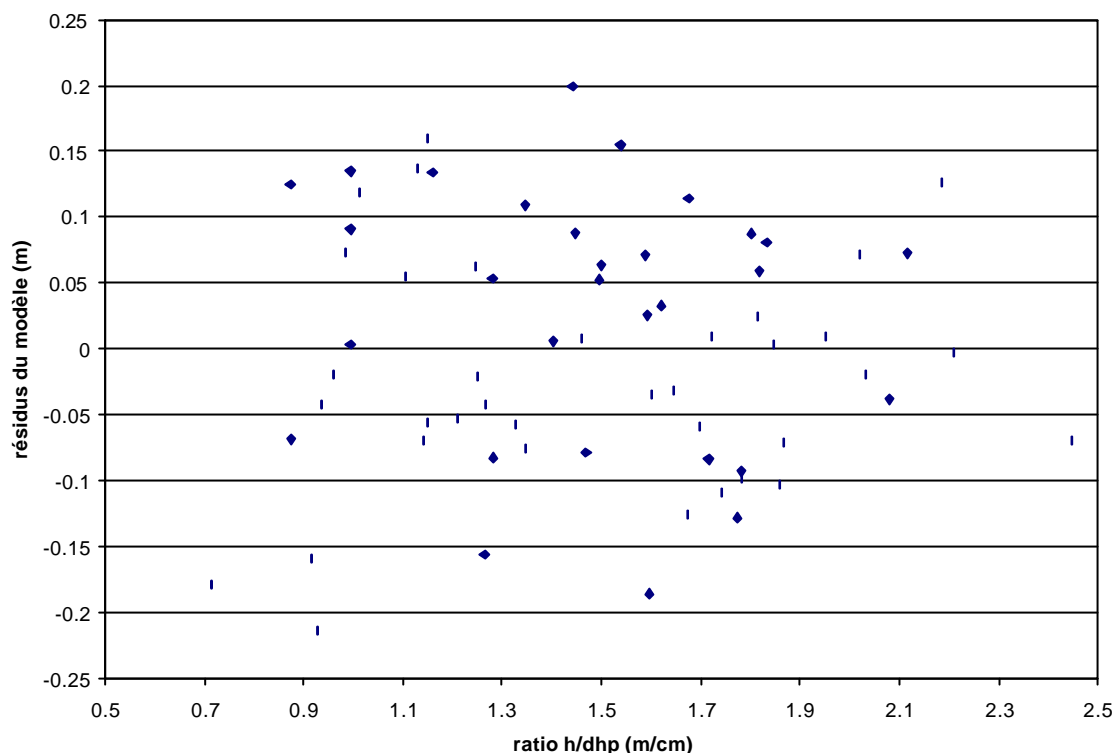


Figure 10. Résidus du modèle de régression linéaire mettant en relation l'accroissement en hauteur du bouleau sur la période allant de 12 à 25 ans et le ratio h/dhp à 12 ans.

Soit H_0 l'hypothèse "La croissance d'une tige de bouleau après 12 ans est supérieure au seuil désiré", et H_1 l'hypothèse contraire. On a calculé le risque de prédire H_1 alors que H_0 est vraie et le risque de prédire H_0 alors que H_1 est vraie en utilisant le modèle pour un seuil de 0,35 m/an, correspondant à un ratio h/dhp à 12 ans de 1,5 (Tableau 5a) et pour un seuil de 0,40 m/an, correspondant à un ratio h/dhp à 12 ans de 1,2 (Tableau 5b).

Tableau 5. Risques d'erreur dans la prédiction d'une croissance du bouleau après 12 ans supérieure ou inférieure à 0,35 m/an (a) et à 0,40 m/an (b) en utilisant l'équation 1

		Nombre de prédictions				Nombre de prédictions	
		H ₀	H ₁			H ₀	H ₁
Nombre	H ₀	22	12	Nombre	H ₀	38	7
d'observations	H ₁	9	23	d'observations	H ₁	10	11
Pourcentage d'erreur		48	29	Pourcentage d'erreur		39	21

a) Croissance désirée = 0,35 m/an,
ratio h/dhp seuil = 1,5

b) Croissance désirée = 0,40 m/an,
ratio h/dhp seuil = 1,2

Accroissement de l'écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier après 12 ans

1 Variables d'environnement de croissance

En ce qui concerne les variables d'environnement de croissance, l'accroissement de la différence de hauteur entre le bouleau et le peuplier après 12 ans est faiblement expliqué par la différence de hauteur hbop-hpet à l'âge de 12 ans ($r = 0,291$). Par ailleurs, meilleure est la position sociale du bouleau, plus la valeur hbop - hpet augmente ($r = 0,524$) donc moins le bouleau présente de retard de croissance en hauteur par rapport au peuplier. En outre, plus les indices de compétition sont élevés, plus la dominance du peuplier s'affirme par rapport au bouleau ($r = -0,499$ avec IC_dhp et $r = -0,460$ avec IC_h). En revanche, l'évolution de la compétition en hauteur entre le bouleau et le peuplier est indépendante de la densité du peuplement et de la différence de hauteur à l'établissement (r non significatifs) (Tableau 4).

2 Variables morphométriques

En ce qui concerne les variables morphométriques, plus le ratio hauteur/diamètre du bouleau en 2000 augmente, plus le peuplier a tendance à prendre le dessus sur le bouleau en termes de croissance en hauteur ($r = -0,406$). Il en va de même avec le ratio h/dhp à 12 ans ($r = -0,303$). La hauteur du bouleau à 12 ans n'est pas corrélée de façon

significative avec l'accroissement de l'écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier après 12 ans (Tableau 4).

Lien entre le ratio h/dhp, la position sociale et la compétition

Le ratio h/dhp du bouleau est un bon indicateur du degré de compétition existant entre une tige-sujet de bouleau et les tiges-compétition associées. Plus le ratio h/dhp en 2000 augmente, plus la position sociale du bouleau est faible ($r = -0,825$, $p < 0,01$). Les bouleaux dont le ratio h/dhp est supérieur à la valeur-seuil de 1,3 ont une position sociale négative, tandis que les bouleaux ayant un ratio h/dhp inférieur à 1,3 ont une position sociale positive (Figure 11). La ratio h/dhp à 12 ans est également fortement corrélé avec les indices de compétition en diamètre ($r = 0,677$) et en hauteur ($r = 0,471$) en 2000, ainsi qu'avec la position sociale en 2000 ($r = -0,700$).

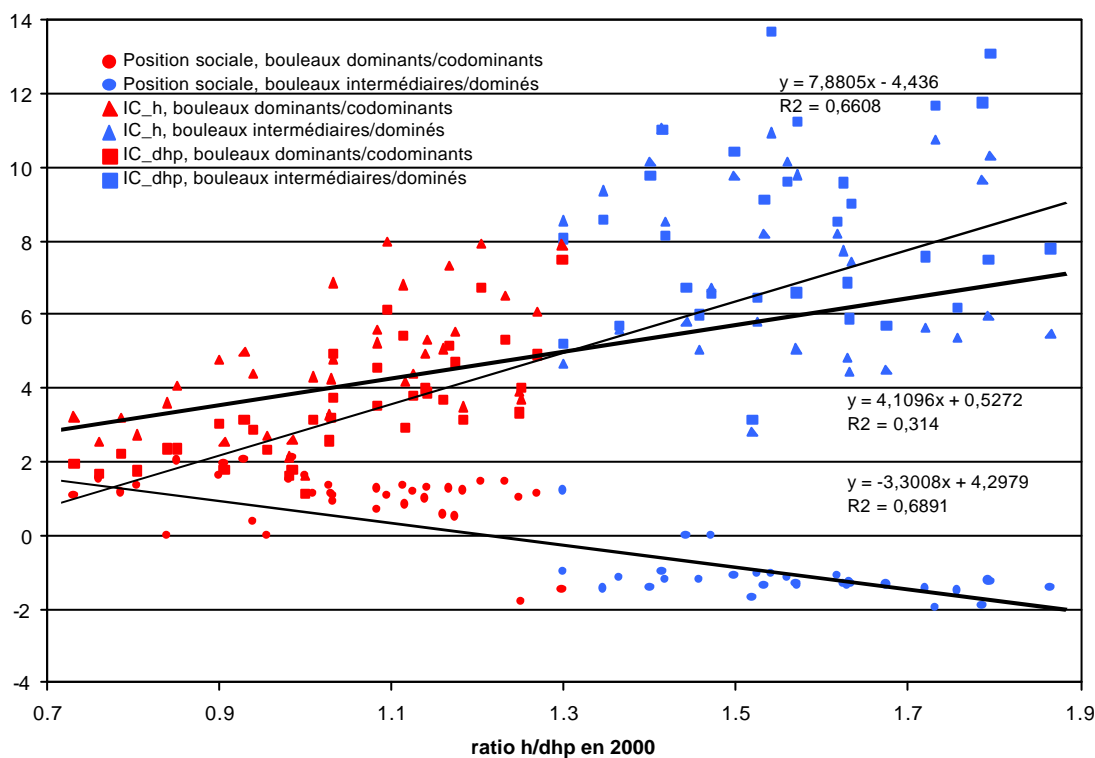


Figure 11. Relations entre le ratio h/dhp, les indices de compétition en diamètre et en hauteur et la position sociale en 2000.

Analyse de la branchaison

Le ratio hauteur sans branche vivante/hauteur totale n'est significativement corrélé avec aucune autre variable (exceptée la hauteur sans branche vivante) ; en particulier, il n'existe aucune corrélation significative entre les variables de branchaison et la densité (Tableau 4). Les bouleaux dominants/codominants ont une hauteur sans branche vivante plus élevée que les intermédiaires/dominés ; en revanche, leur ratio hauteur sans branche vivante/hauteur totale est plus faible que celui des intermédiaires/dominés (Tableaux 6 et 7).

Tableau 6. Statistiques descriptives pour la hauteur sans branche vivante et le ratio hauteur sans branche vivante/hauteur totale pour les individus intermédiaires/dominés et dominants/codominants en 2000

Variable	Position sociale	N	Moyenne	Déviations standart	Erreur moyenne standart
Hauteur sans branche vivante	dominés	33	3,0624	0,9326	0,1623
	dominants	37	3,8149	1,2391	0,2037
Ratio hsb/hauteur totale	dominés	33	0,4335	0,1076	0,018
	dominants	37	0,3899	0,1097	0,018

Tableau 7. Résultats du test de Student entre la hauteur sans branche vivante moyenne pour les bouleaux dominants/codominants et les bouleaux intermédiaires/dominés

Variable	t	DL	p
Ratio hsb/hauteur totale	1,674 ^a	68 ^a	0,099 ^a
Hauteur sans branche vivante	-2,889 ^b	66,206 ^b	0,005 ^b

a : test de Student à variances égales

b : test de Student à variances inégales

Discussion

La compétition interspécifique est en faveur du peuplier faux-tremble, dont la croissance est plus rapide que celle du bouleau à papier. Les accroissements que nous avons observés pour le bouleau (moyenne des accroissements annuels de 41 cm) correspondent approximativement aux valeurs données par la littérature pour les rejets de souche, soit une hauteur moyenne de 1,5 m à l'âge de trois ans selon Jobidon (1995) et Haeussler et Coates (1986). La moyenne des accroissements annuels du peuplier dans notre étude est de 0,51 m, ce qui est légèrement inférieur aux valeurs de la littérature. D'après Horton et Maini (1964), au cours de la deuxième année et des suivantes, le taux de croissance des drageons dominants de peuplier faux-tremble varie entre 0,5 à 1,0 m/an. Dans de jeunes tremblais d'Alberta et de Saskatchewan, Bella et De Franceschi (1980) ont constaté que les drageons dominants mesuraient en moyenne 1,7 m à la fin de la deuxième saison de végétation, 2,4 m à la fin de la troisième, 3,0 m à la fin de la quatrième et 3,5 m à la fin de la cinquième, tandis que l'étude de LaBonte et Nash (1978) indique une hauteur d'environ 7 m à l'âge de 6 ans, ce qui correspond à environ 1,2 m/an.

Plus de 90 % des tiges-sujet de bouleau sont affectées par un ralentissement de croissance vers l'âge de 12 ans. Cet essoufflement est important, puisque sur l'ensemble des bouleaux l'accroissement en hauteur est 1,6 fois plus élevé pendant la phase allant de 0 à 12 ans qu'après 12 ans. Les bouleaux dominants et codominants réussissent mieux que les bouleaux de statut intermédiaire ou dominé à maintenir leur croissance après 12 ans. L'accroissement en hauteur est 1,4 fois plus élevé avant qu'après 12 ans si l'on considère seulement les bouleaux dominants et codominants, et 1,7 fois plus élevé avant qu'après 12 ans si l'on considère seulement les bouleaux intermédiaires et dominés (Tableau 2). Quant au peuplier, il ne subit pas de changement de croissance à 12 ans ; en revanche, il enregistre une accélération de sa croissance vers l'âge de 15 ans, soit 3 ans après le début du ralentissement de croissance du bouleau (Annexe 2c). Ainsi, il semble que l'essoufflement du bouleau profite au peuplier après un délai de réponse de 3 ans. Il se pourrait également que cette accélération de croissance en hauteur des tiges de peuplier coïncide avec le début de la hiérarchisation intraspécifique, autrement

dit l'individualisation de tiges dites "sprinters" qui supplantent les autres tiges de peuplier, moins aptes à faire face à la compétition intraspécifique. Cette hypothèse est suggérée par les résultats de Peet et Christensen (1987), qui ont mis en évidence l'existence d'une phase d'éclaircie naturelle où l'intensité de la compétition entraîne une forte mortalité des individus désavantagés et une croissance accrue des survivants.

Il est intéressant d'identifier les facteurs liés à la croissance du bouleau après 12 ans afin d'être en mesure de discriminer les tiges susceptibles d'être affectées par le ralentissement de croissance. Tout d'abord, cette étude nous donne plusieurs informations ayant trait à l'impact des variables d'environnement de croissance sur l'accroissement en hauteur du bouleau à papier après 12 ans. Premièrement, la croissance en hauteur du bouleau après 12 ans n'est que faiblement corrélée à la densité du peuplement (Tableau 4). Or plusieurs auteurs, tels que Marquis et al. (1969) et Puttonen (1996), recommandent d'effectuer le dégagement sur la base de la densité. Ce critère pourrait donc être remis en question. Deuxièmement, les indices de compétition en hauteur et en diamètre sont corrélés avec l'accroissement en hauteur du bouleau après 12 ans (Tableau 4). La dépendance de la croissance en hauteur du bouleau par rapport à l'environnement de compétition est également illustrée par la forte corrélation entre l'accroissement en hauteur après 12 ans et la variable "position sociale" en 2000, ainsi que par la corrélation relativement importante entre l'accroissement en hauteur après 12 ans et la différence de hauteur entre la tige-sujet de bouleau et la tige-compétition de peuplier associée à 12 ans (Tableau 4).

En ce qui concerne l'effet des variables liées à l'environnement de croissance du bouleau sur l'évolution de l'écart de hauteur entre le bouleau et le peuplier après 12 ans, on constate que l'accentuation de l'avantage compétitif du peuplier faux-tremble par rapport au bouleau est indépendant de la densité. Par ailleurs, l'avantage acquis par le peuplier lors de son établissement, pourtant fortement corrélé négativement avec le ratio h/d_{hp} à 12 ans et positivement avec la hauteur du bouleau à 12 ans, n'explique que faiblement l'augmentation de l'avance du peuplier par rapport au bouleau après que le bouleau a atteint l'âge de 12 ans (Tableau 4). Ceci est dû au fait que, pour la plupart des

paires bouleau-peuplier (60 sur 72 soit 83 %, Tableau 3), la hauteur du peuplier à l'établissement est supérieure à celle du bouleau, avec dans la très grande majorité des cas une différence importante (souvent de 1 à 2,5 m) ; on ne dispose donc pas d'un gradient de valeurs de la variable "écart de hauteur à l'établissement" suffisant pour observer un effet de cette variable sur l'évolution de la différence de croissance en hauteur entre le peuplier et le bouleau sur la période 12-25 ans. Ainsi, cette absence de corrélation significative ne permet pas de conclure à l'absence d'effet de l'avantage initial du peuplier sur l'accroissement de la différence en hauteur entre le bouleau et le peuplier après l'âge de 12 ans.

Le ratio h/dhp est une variable morphométrique qui constitue un bon prédicteur de l'accroissement en hauteur du bouleau après 12 ans (Tableau 4). Ceci est lié au fait que ce ratio est un excellent indicateur de la compétition entre les tiges, ce qui est en accord avec les résultats de Schneider (1998) indiquant que la probabilité de survie chez les sapins de Douglas et les pins ponderosa dans l'Oregon diminue lorsque le ratio h/dhp augmente. Un rapport h/dhp élevé traduit un déséquilibre entre croissance en hauteur et croissance en diamètre, qui résulte du fait que l'effet négatif dû à la compétition est plus marqué sur la croissance en diamètre que sur la croissance en hauteur (Jobidon, 2000). On a identifié la valeur limite du ratio h/dhp discriminant les tiges de position sociale positive des tiges de position sociale négative : les tiges de position sociale positive correspondent à celles dont le ratio h/dhp (exprimé en m/cm) est inférieur à 1,3 (Figure 11). Le modèle linéaire développé (Équation 1) permet de prédire si une tige de ratio h/dhp connu constitue ou non une tige d'avenir, en fonction des exigences portant sur la croissance des tiges c'est-à-dire de l'intensité de la sylviculture.

D'après notre étude, la croissance en hauteur du bouleau commence à diminuer vers l'âge de 12 ans (Figure 8). On peut supposer que ce ralentissement a lieu en réponse à un stress intervenant quelques années auparavant, ce qui justifie la réalisation d'une intervention au plus tard vers 10 ans. Ces résultats s'accordent avec ceux de la littérature. En effet LaBonte et Nash (1978) mentionnent que, lorsque le peuplement est envahi par des essences à croissance rapide comme le peuplier faux-tremble, la période de dégagement optimale pour le bouleau à papier se situe entre 5 et 10 ans. Marquis et

al. (1969) conseillent aussi d'effectuer un nettoyage entre 5 et 10 ans lorsque l'indice de station est supérieur à 70. Safford (1983), quant à lui, préconise de réaliser le nettoyage le plus tôt possible, avant que les bouleaux ne soient opprimés et lorsque le nombre d'individus entre lesquels choisir les tiges d'avenir est maximal. Puttonen (1996) suggère une première intervention lorsque le bouleau atteint 3 m, hauteur que les bouleaux de notre étude atteignent en moyenne à l'âge de 8 ans environ.

Les tiges de bouleau à faible ratio h/dhp et à forte croissance semblent être à l'abri de la concurrence du peuplier, ce qui réduit l'utilité d'un dégagement de ces tiges. Ce résultat diffère de ceux obtenus dans plusieurs études antérieures, qui font état de la nécessité de dégager tous les bouleaux à papier soumis à la concurrence du peuplier faux-tremble, en commençant par les tiges de bouleaux en position dominante. Par exemple, LaBonte et Nash (1978) ont montré qu'un nettoyage systématique s'impose lorsque des tiges à croissance rapide, notamment de peuplier faux-tremble, surplombent le bouleau à papier. En revanche, les résultats de notre étude sont en accord avec ceux obtenus par Doyon et al. (2000), qui ont prouvé que le dégagement des tiges dominantes n'apporte aucun gain de croissance, les feuilles des tiges dominantes ayant déjà atteint le maximum de leur activité photosynthétique. En outre, pour ces tiges, une augmentation de l'appareil photosynthétique se traduirait par la formation de branches basses, donc par une dépréciation de la qualité. L'étude de Leak et Smith (1997), qui a montré que les éclaircies pré-commerciales réalisées dans le jeune âge ont peu d'effet sur la structure finale du peuplement, portait sur des dégagements pratiqués au profit des tiges dominantes, ce qui corrobore les résultats de notre étude et ceux de Doyon et al. (2000).

L'absence de corrélation significative entre la hauteur sans branche vivante et la densité ainsi qu'entre le ratio hauteur sans branche vivante (hsb)/hauteur totale et la densité signifie que, dans la gamme de valeurs observées, soit 1600 à 16900 tiges par hectare, le facteur densité n'influe pas sur la formation de branches. Il en va de même pour l'absence de corrélation significative entre le ratio hsb/hauteur totale et les indices de compétition (Tableau 4). Les résultats concernant les relations entre position sociale et branchaison sont à interpréter avec précaution (Tableaux 6 et 7). Les valeurs de

hauteurs sans branche plus fortes observées pour les individus dominants et codominants semblent n'être que le reflet des hauteurs plus élevées de ces individus. Les individus de statut intermédiaire ou dominé, c'est-à-dire les individus de petite taille, pourraient dans le futur voir leur ratio hsb/hauteur totale diminuer du fait de l'élagage naturel. D'après Doyon et al. (2000), la production de branches adventives n'est pas observée à la suite d'une éclaircie pré-commerciale modérée chez le bouleau à papier. L'identification d'un seuil de dégagement au-delà duquel la production de branches est stimulée nécessiterait des densités beaucoup plus faibles que les densités observées dans notre étude.

Recommandations

Cette étude a montré que la croissance en hauteur du bouleau à papier dépend davantage de la hiérarchisation sociale en hauteur que de la densité du peuplement. La densité et le stocking sont actuellement les seuls critères pris en compte pour décider de l'opportunité d'une éclaircie pré-commerciale. Or notre étude a montré que la densité n'est que faiblement corrélée à la croissance en hauteur des tiges de bouleau après l'âge de 12 ans. La méthode de diagnostic des peuplements devrait donc être modifiée pour s'appuyer sur un critère permettant d'estimer si les tiges ont réellement besoin d'être dégagées. Cette étude a montré que la croissance en hauteur du bouleau, et donc la nécessité éventuelle d'un dégagement, sont fonction de la position sociale de la tige. Les tiges de bouleau bien placées du point de vue de la hiérarchisation sociale maintiennent une croissance en hauteur satisfaisante et n'ont donc pas besoin d'être dégagées. Le critère morphométrique "ratio h/dhp" s'étant révélé un excellent indicateur de la position sociale, il pourrait avantageusement servir de base au diagnostic des peuplements de bouleaux à papier. La hauteur du bouleau à 12 ans pourrait aussi être utilisée pour identifier les situations où un dégagement s'impose, d'autant plus qu'il s'agit d'un critère plus facile d'utilisation que le ratio h/dhp : cependant, étant donné le meilleur pouvoir prédictif du ratio h/dhp, nous conseillons l'emploi de celui-ci de préférence à la hauteur à 12 ans. Ainsi, la démarche adoptée consiste à utiliser le critère "ratio h/dhp" pour discriminer les peuplements nécessitant un dégagement : ces peuplements seront identifiés par leur nombre trop faible de tiges à croissance satisfaisante (c'est-à-dire bien positionnées dans la hiérarchie sociale et dotées d'un faible ratio h/dhp).

Comment déterminer le stocking en tiges d'avenir, repérées à l'aide du critère "ratio h/dhp", en dessous duquel un dégagement est nécessaire ? Dans l'optique de produire du bouleau de qualité sciage/déroulage, il est souhaitable que la densité à la première éclaircie commerciale soit d'environ 400 tiges par hectare. Le stocking dans des parcelles de 25 m² doit alors être de 65 %. Plaçons-nous dans un premier temps dans le cas où la croissance en hauteur-objectif après 12 ans est de 35 cm/an. Cet exemple pourrait correspondre au cas d'une sylviculture relativement peu intensive (désigné dans la suite par le terme "sylviculture extensive"). Devant un peuplement de

bouleaux à papier d'âge inférieur à 12 ans, on se demande s'il est nécessaire d'effectuer ou non un dégagement. On a vu que le ratio h/dhp à 12 ans correspondant à une croissance après 12 ans de 35 cm/an est égal à 1,5 (Équation 1). Ainsi, dans ce cas, le modèle développé prédit que les tiges d'avenir sont celles dont le ratio h/dhp à 12 ans est inférieur à 1,5. Soit A le pourcentage de parcelles de 25 m² échantillonnées dans lesquelles il existe au moins une tige de bouleau de ratio h/dhp inférieur à 1,5 et B le pourcentage de parcelles de 25 m² échantillonnées dans lesquelles toutes les tiges de bouleau ont un ratio h/dhp supérieur à 1,5. Deux cas peuvent se présenter :

Dans le premier cas, le stocking total en bouleau à papier est inférieur à 65 % ($A + B < 65 \%$). Le peuplement est alors insuffisamment stocké pour être destiné à la production prioritaire de bouleau à papier. Dans ce cas, le dégagement est à proscrire (Figure 12).

Dans le deuxième cas, le stocking en parcelles de type A et B est supérieur ou égal à 65 %. Reste à déterminer le stocking en tiges d'avenir de bouleau à papier. D'après le modèle développé, le risque de prédire à tort une croissance inférieure à 35 cm/an à partir du ratio h/dhp est de 29 % et que le risque de prédire à tort une croissance supérieure à 35 cm/an à partir du ratio h/dhp est de 48 % (Tableau 5a). Par conséquent, pour obtenir le stocking réel en tiges d'avenir, il faut enlever 48 % des tiges de ratio h/dhp inférieur à 1,5 (correspondant au pourcentage de tiges que le modèle indique comme étant des tiges d'avenir mais qui n'en sont pas) et ajouter 29 % des tiges de ratio h/dhp supérieur ou égal à 1,5 (correspondant au pourcentage de tiges que le modèle classe comme ayant une croissance inférieure à 35 cm/an mais qui ont en fait une croissance supérieure à 35 cm/an). Le stocking en tiges d'avenir est donc $0,52*A + 0,29*B$. On se trouve donc devant l'alternative suivante : ou bien $0,52*A + 0,29*B \geq 65 \%$, auquel cas le stocking en tiges d'avenir est suffisant et aucun dégagement n'est nécessaire, ou bien $0,52*A + 0,29*B < 65 \%$, auquel cas un dégagement est recommandé (Figure 12).

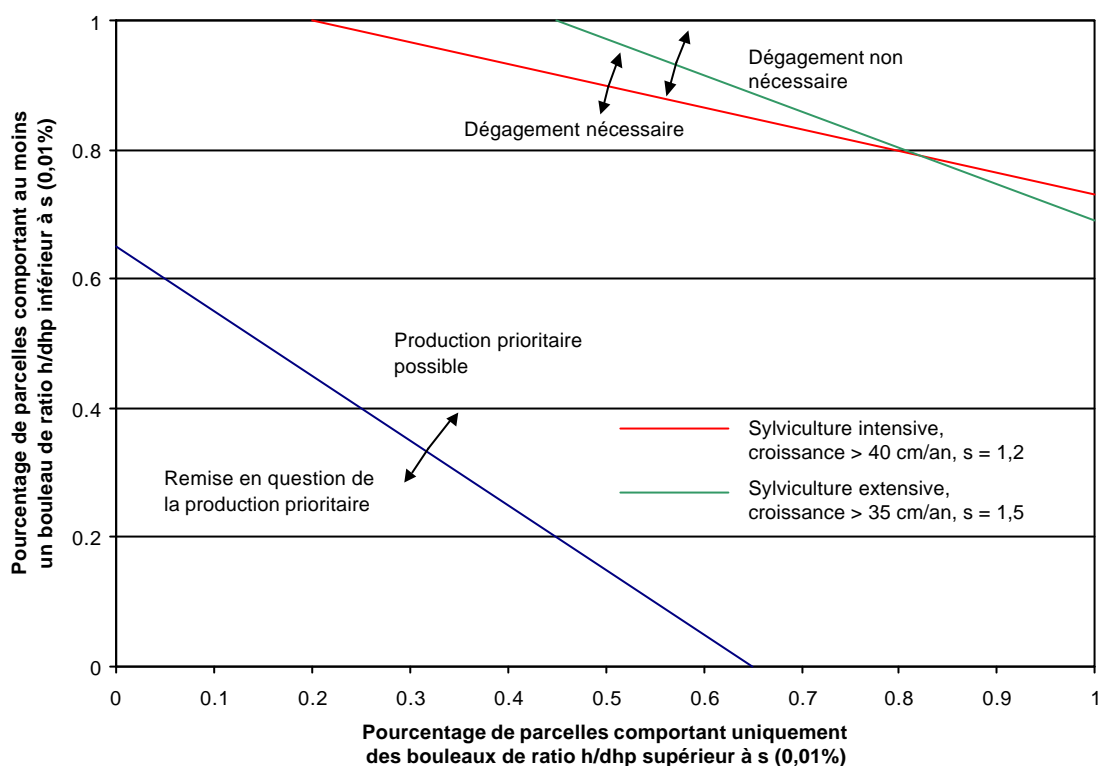


Figure 12. Diagramme décisionnel indiquant dans quels cas effectuer un dégagement lorsque la croissance-objectif du bouleau après 12 ans est égale à 35 cm/an (sylviculture extensive) ou 40 cm/an (sylviculture intensive).

La valeur-seuil du stocking en tiges d'avenir en dessous de laquelle un dégagement est nécessaire est susceptible d'être modifiée en fonction de l'intensité de la sylviculture. Par exemple, supposons que l'on se place dans le cas d'une sylviculture plus intensive que précédemment où les tiges de bouleau, pour être considérées comme tiges d'avenir, doivent avoir une croissance supérieure à 40 cm/an, ce qui correspond à un ratio h/dhp inférieur à 1,2. Le risque de prédire à tort une croissance inférieure à 35 cm/an à partir du ratio h/dhp est alors de 21 % et le risque de prédire à tort une croissance supérieure à la croissance moyenne à partir du ratio h/dhp est de 39 % (Tableau 5b). En suivant la même démarche que précédemment, on obtient qu'il est nécessaire de dégager si $0,61 \cdot A + 0,21 \cdot B < 65 \%$, où A est le pourcentage de parcelles de 25 m² échantillonnées dans lesquelles il existe au moins une tige de bouleau de ratio h/dhp inférieur à 1,2 et B le pourcentage de parcelles de 25 m² échantillonnées dans lesquelles toutes les tiges de bouleau ont un ratio h/dhp supérieur à 1,2 (Figure 12).

Ainsi, plus les exigences portant sur la croissance en hauteur seront élevées, plus le stocking en tiges de ratio h/dhp inférieur au seuil correspondant devra être élevé pour que l'on n'ait pas besoin de dégager. Il est donc possible de caractériser l'impact de la situation sociale d'une tige sur sa croissance en hauteur par l'intermédiaire du critère morphométrique "ratio h/dhp ".

Dans les peuplements nécessitant une éclaircie pré-commerciale, seules les tiges menacées par la compétition du peuplier devraient être dégagées, contrairement aux pratiques de dégagement systématique basées sur la densité faisant référence entre autres aux études de Lamson et Smiths (1987), Marquis *et al.* (1969) et Puttonen (1996).

Conclusion

On a observé un impact de la compétition du peuplier faux-tremble sur la croissance du bouleau à papier, qui se traduit par un ralentissement de croissance notable du bouleau vers l'âge de 12 ans. Ce ralentissement est davantage lié à la hiérarchisation sociale en hauteur qu'à la densité du peuplement. La variable morphométrique "ratio h/dhp" s'est révélée un bon indicateur du degré de compétition subi par une tige de bouleau : la valeur limite du ratio h/dhp au dessus de laquelle une tige de bouleau est opprimée par la compétition environnante est égale à 1,3. On a démontré l'utilité du critère morphométrique "ratio h/dhp" comme élément de diagnostic pour identifier les situations dans lesquelles un dégagement s'impose et on a mis au point un outil d'aide à la décision basé sur cet indicateur, permettant au sylviculteur de sélectionner rapidement les peuplements à dégager. Le ratio h/dhp pourrait donc avantageusement remplacer le critère densité pour juger de la nécessité d'une éclaircie pré-commerciale dans un peuplement. Le dégagement, dans les peuplements où il est nécessaire, devrait se faire par puits de lumière et porter principalement sur les tiges codominantes dont la croissance est menacée par des tiges de peuplier compétitrices. Cette méthode se rapproche de la méthode dite "à l'européenne", avec maintien de tiges utiles à l'éducation du peuplement. Il n'y a pas de risque d'entraîner une dépréciation de la qualité des tiges sauf pour des densités extrêmement faibles. Les processus à l'origine de l'expression du désavantage du bouleau dans les peuplements constitués d'un mélange de bouleaux et de peupliers sont sans doute liés à une endogénèse plus favorable du peuplier par rapport au bouleau. D'autres études seraient nécessaires afin de préciser les connaissances à ce sujet.

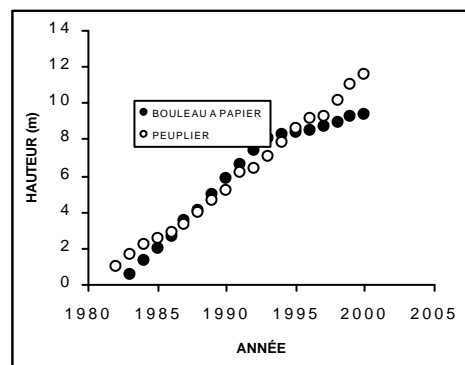
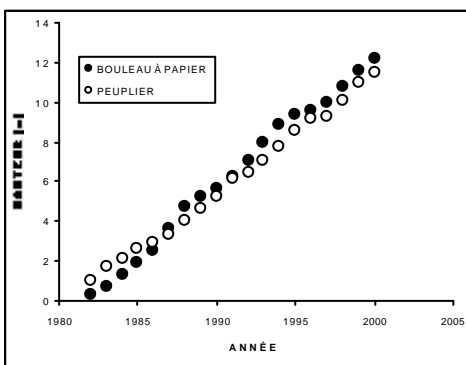
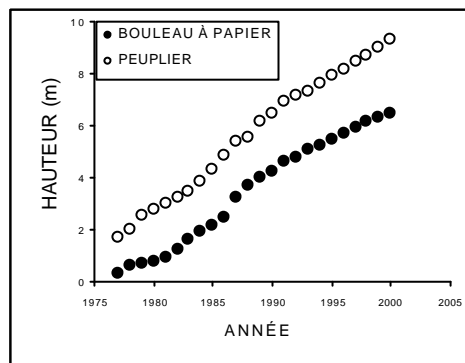
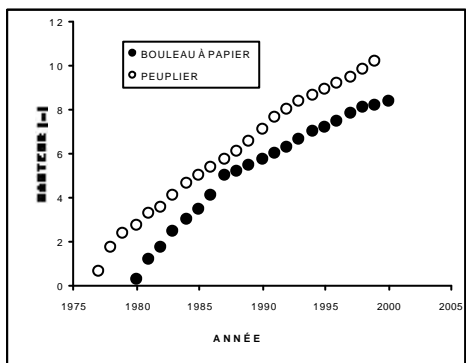
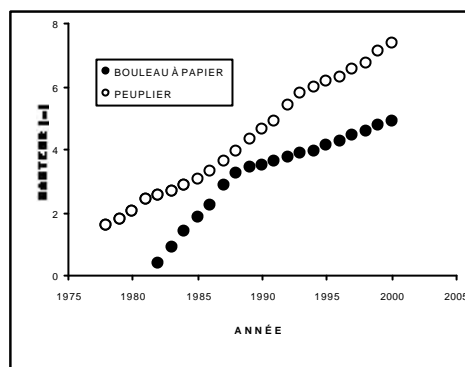
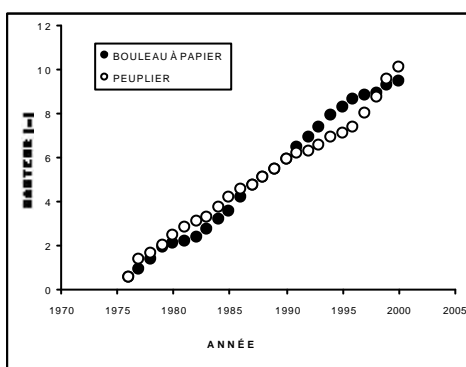
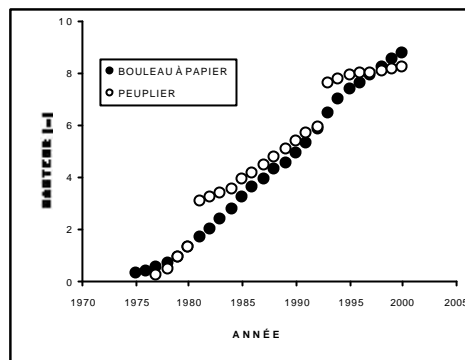
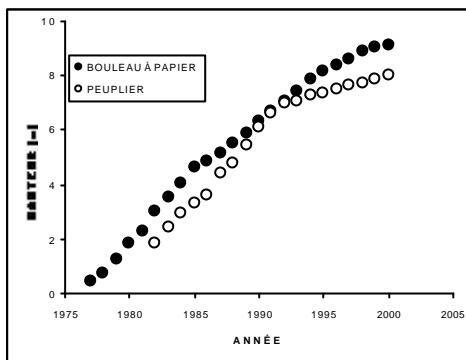
Références citées

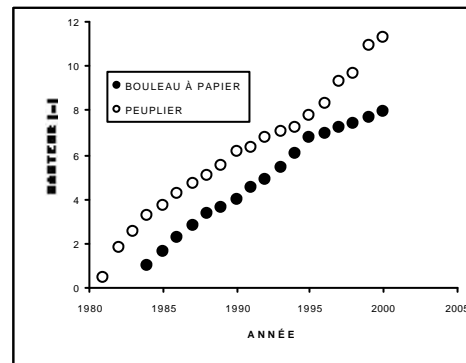
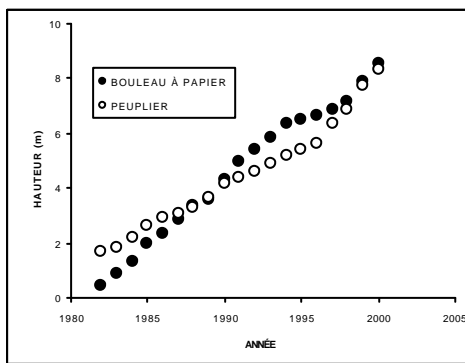
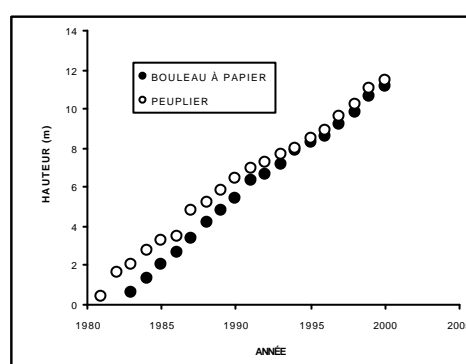
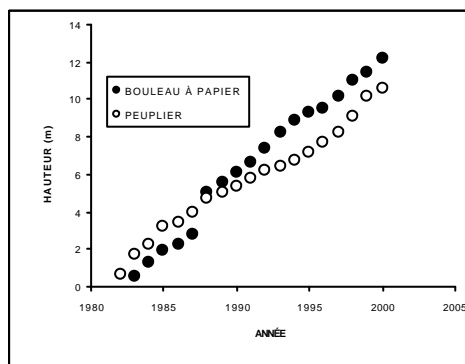
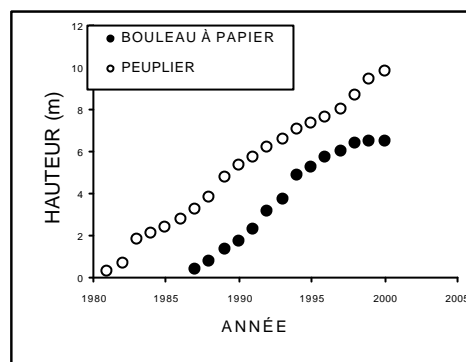
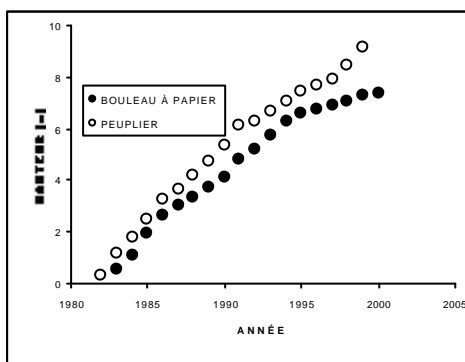
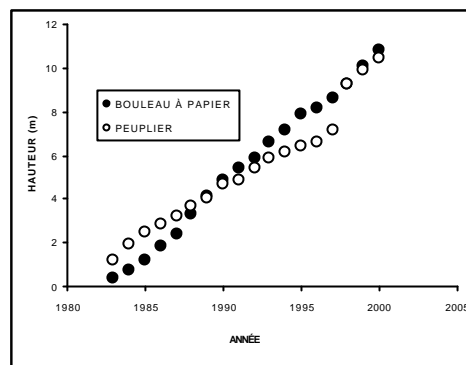
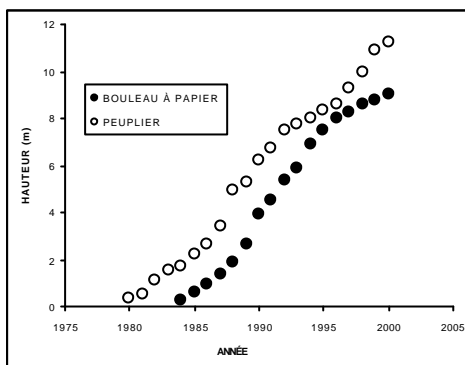
- Bella, I. E. et J. P. De Franceschi. 1980. Biomass productivity of young aspen stands in western Canada. Inf. Rep. NOR-X-219. Canadian Forestry Service. Alberta. 29 p.
- Doyon, F., J. Goulet, P. Nolet et A. Patry. 2000. Etude de l'éclaircie pré-commerciale dans les jeunes peuplements de feuillus durs. Rapport de l'Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue. Saint-André-Avellin. 37 p.
- Godman, R. M. et D. A. Marquis. 1969. Thinning and pruning in young birch stands. Proceedings of the Birch Symposium. USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Upper Darby, PA. p.119-127.
- Haeussler, S. et D. Coates. 1986. Autecological characteristics of selected species that compete with conifers in British Columbia : a literature review. Land Management Report No. 33. Ministry of Forests, British Columbia. 180 p.
- Hix, D. M. et C. G. Lorimer. 1990. Growth-competition relationships in young hardwood stands on two contrasting sites in southwestern Wisconsin (USA). Forest Science 36(4) : 1032-1049.
- Horton, K. W. et J. S. Maini. 1964. Aspen reproduction : its characteristics and control. Can. Dep. For., Res. Br. Ottawa, Ontario. Rep. No. 64-0-12.
- Jobidon, R. 1995. Autoécologie de quelques espèces de compétition d'importance pour la régénération forestière au Québec. Revue de littérature. Ministère des Ressources Naturelles, Québec. Mémoire de recherche forestière No. 117. 180 p.
- Jobidon, R. 2000. Les feuillus de lumière : une menace au succès des plantations d'épinette. Aubelle No. 133 : p. 13-14.
- LaBonte, G. A. et R. J. Leso. 1990. Cleaning paper birch in a birch-aspen stand in Maine : a 24-year case history. North. J. Appl. For. 7(1) : p. 22-23.
- LaBonte, G. A. et R. W. Nash. 1978. Cleaning and weeding paper birch, a 24-year case history. J. For. 76 : p. 223-225.
- Lamson, N. I. et H. C. Smiths. 1987. Precommercial treatments of 15- to 40-year-old northern hardwood stands. Managing Northern Hardwoods, Proceedings of a silvicultural symposium. Ralph D. Nyland Ed., SAF Publ. No. 87-03 : p. 160-175.
- Leak, W. B. et M.-L. Smith. 1997. Long-term species and structural changes after cleaning young even-aged northern hardwoods in New Hampshire, USA. For. Ecol. Manage. 95 : p. 11-20.
- Marquis, D. A., D. S. Solomon et J. C. Bjorkbom. 1969. A silvicultural guide for paper birch in the Northeast. USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Research paper NE-130. 46 p.
- Peet, R. K. et N. L. Christensen. 1987. Competition and tree death. Bioscience Vol. 37 No. 8 : p. 586-595.
- Perala, D. A. et A. A. Alm. 1990. Regeneration Silviculture of Birch : a Review.

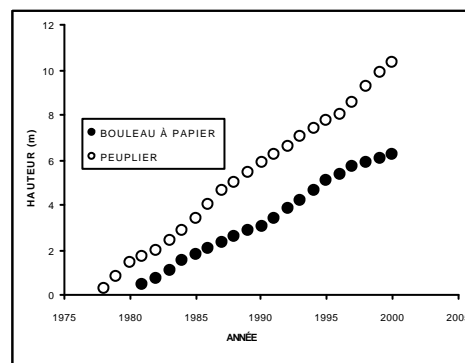
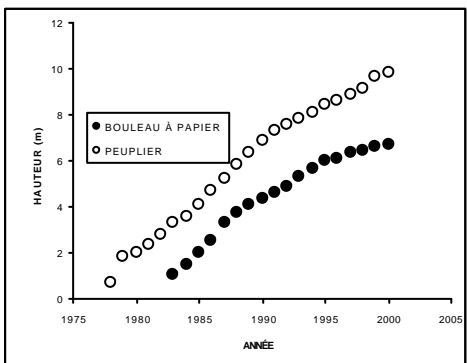
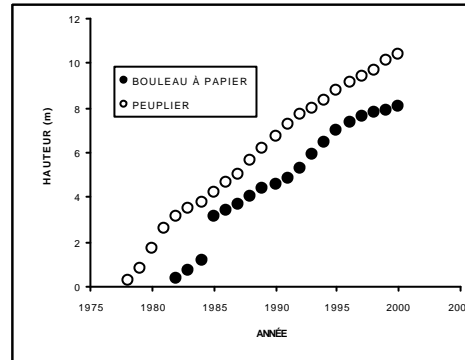
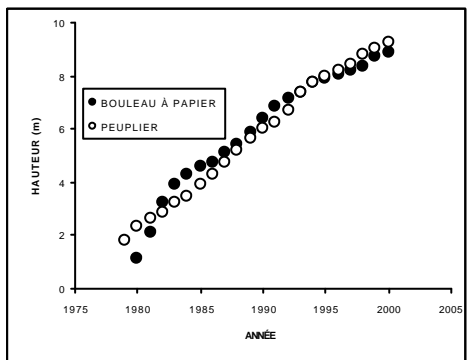
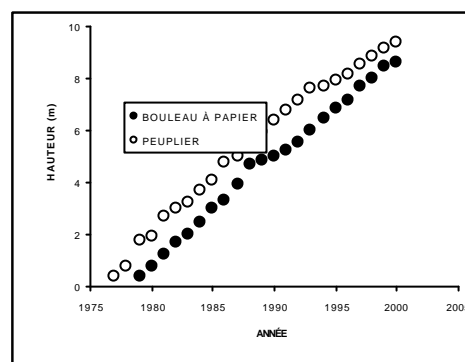
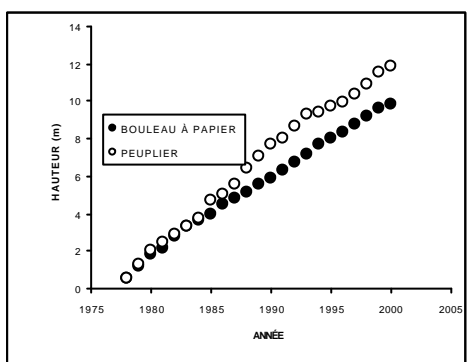
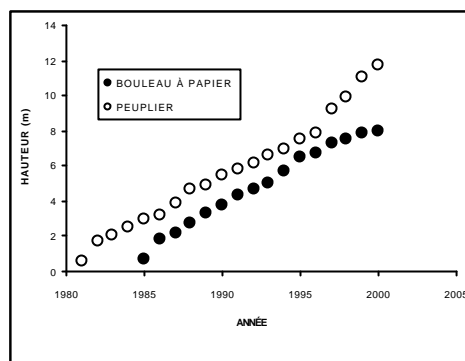
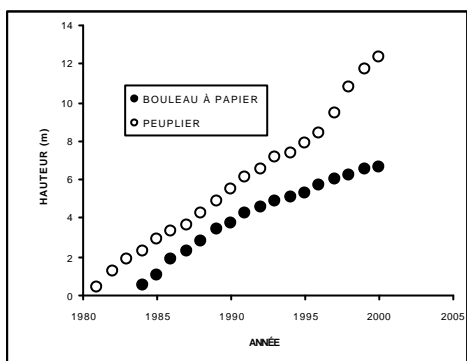
- For. Ecol. Manage. 32 : p. 39-77.
- Puttonen, P. 1996. Birch management in Finland. Ecology and Management of B.C. Hardwoods. Workshop Proceedings. Richmond, B.C. FRDA Report No. 225 : p. 177-187.
- Safford, L. O. 1983. Silvicultural guide for paper birch in the Northeast (rev. ed.). USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Research paper NE-535. 29 p.
- Safford, L. O., J. C. Bjorkbom et J. C. Zasada. 1990. *Betula papyrifera* Marsh. Silvics of North America, Vol. 2 : Hardwoods. USDA Forest Service, Washington. p.158 -171.
- Schneider, W. G. 1998. Predicting survival of planted Douglas-fir and ponderosa pine seedlings on dry, low-elevation sites in southwestern Oregon. New. For. 15(2) : p. 139-159.
- Smith, R. L. 1980. Ecology and Field Biology. 3rd ed. Harper and Row, New York.

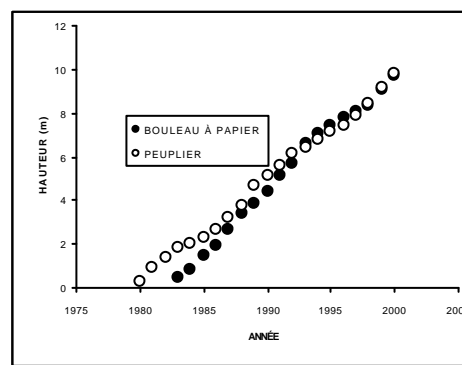
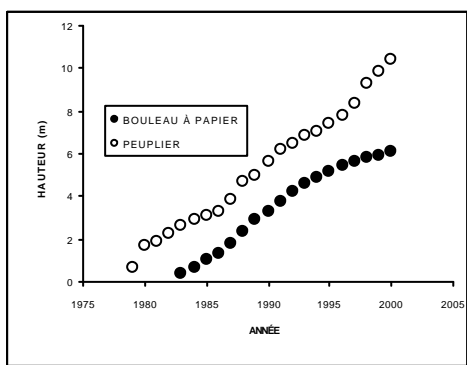
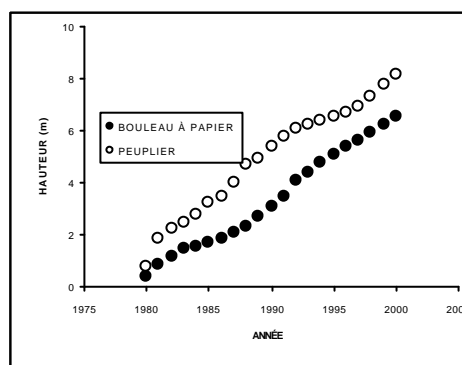
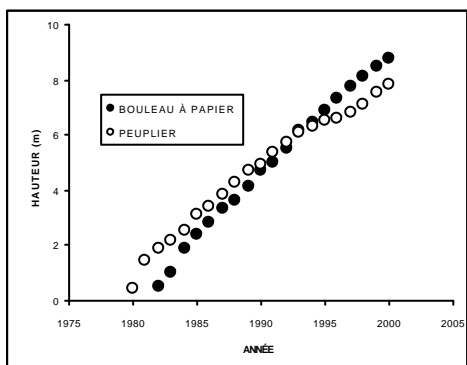
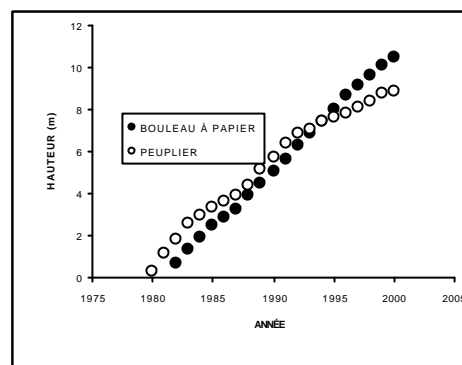
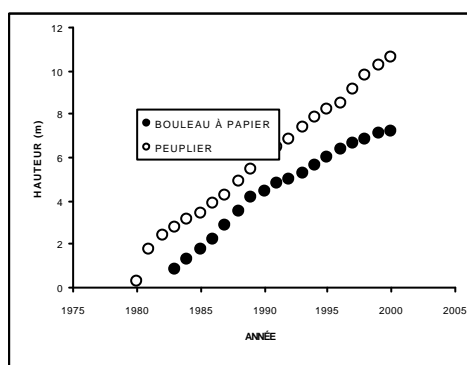
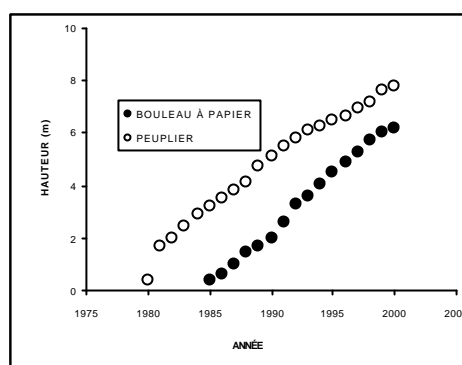
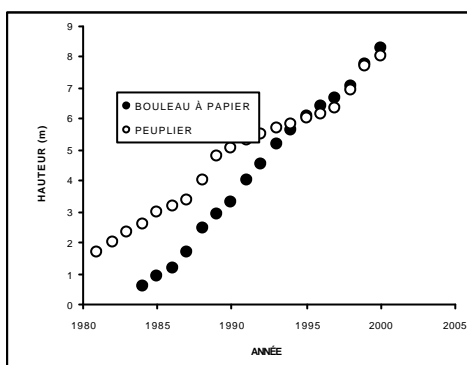
Annexe 1

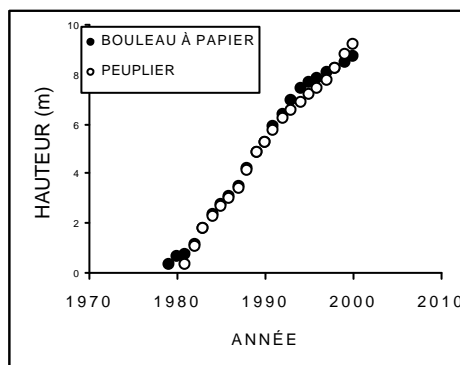
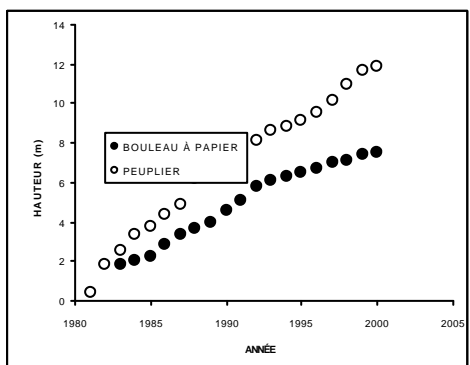
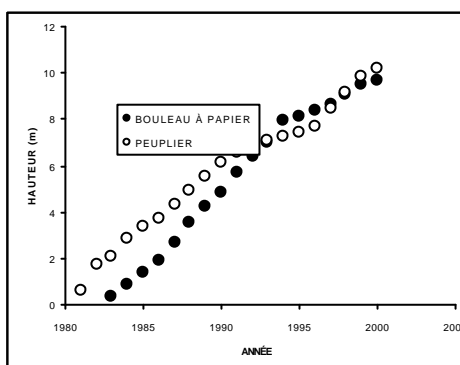
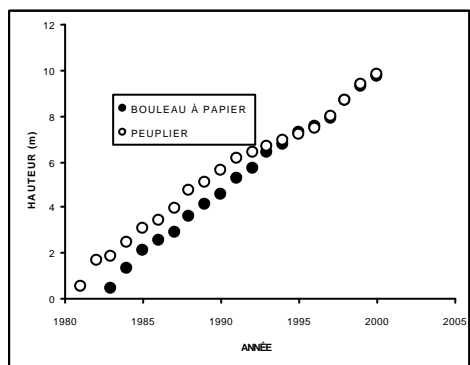
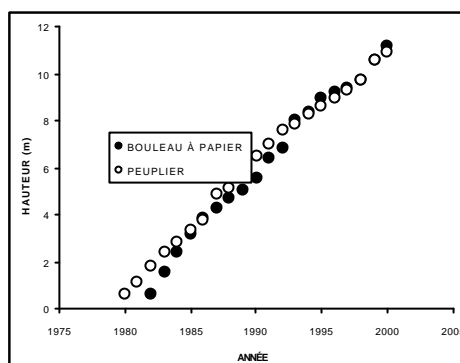
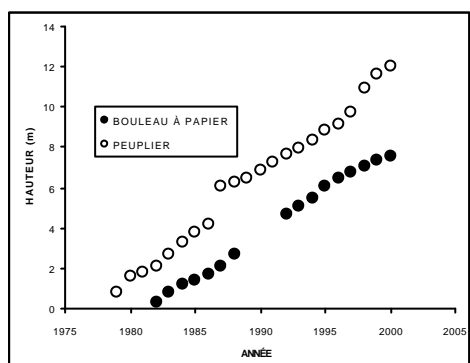
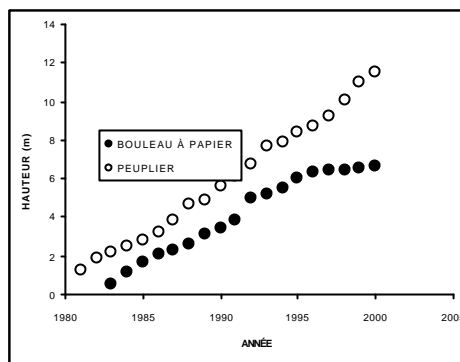
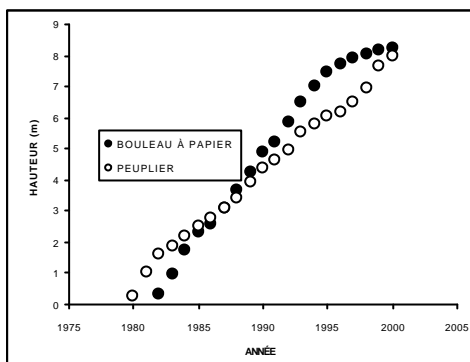
Historique de croissance en hauteur
pour les paires
bouleau-peuplier

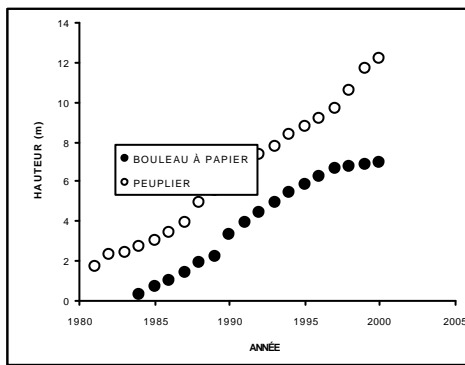
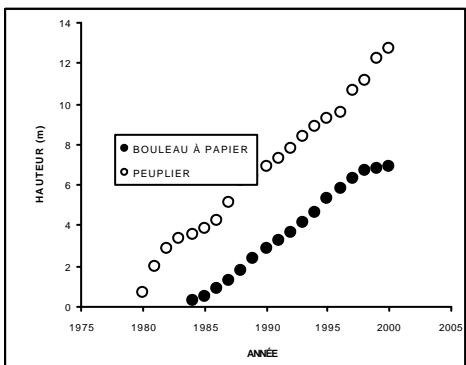
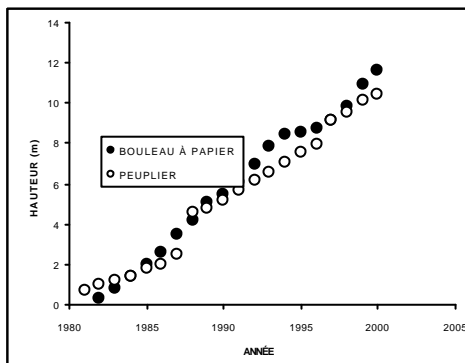
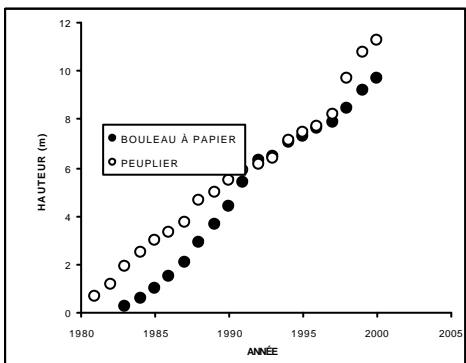
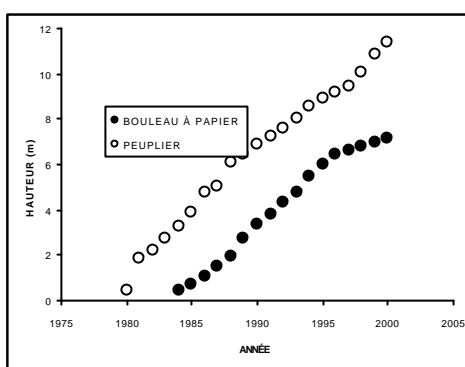
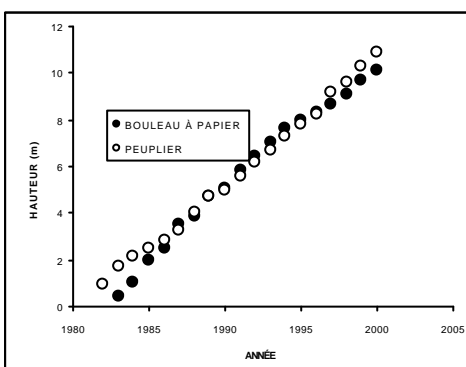
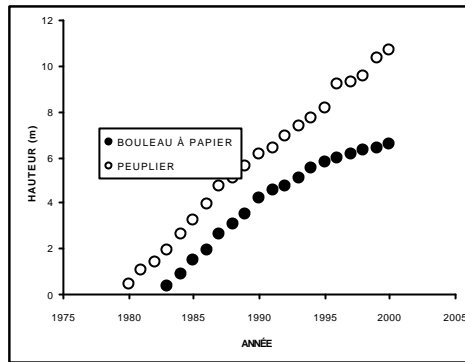
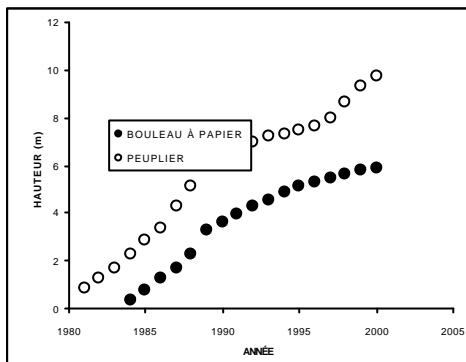


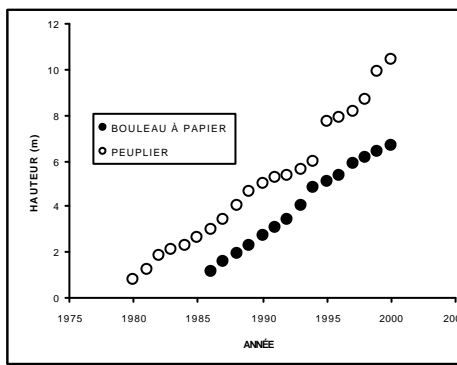
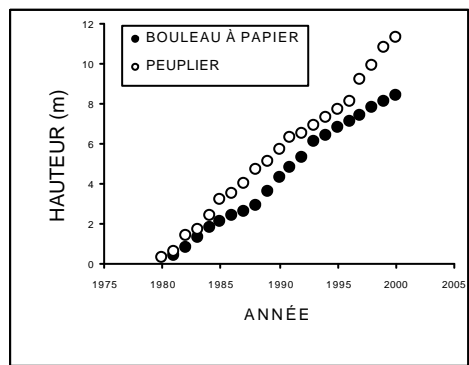
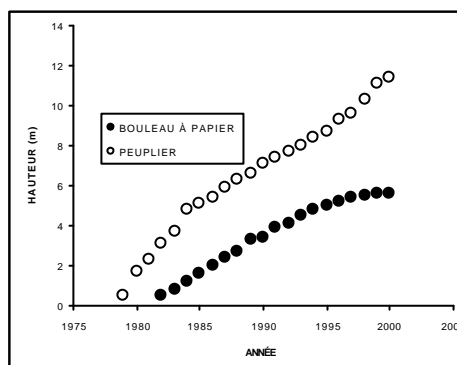
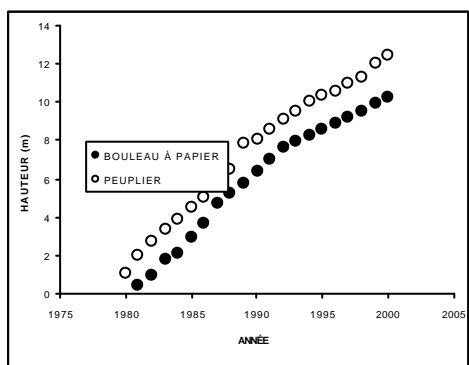
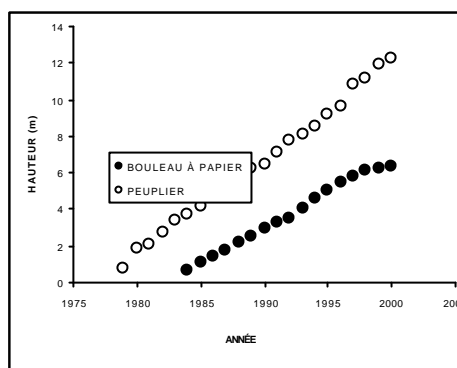
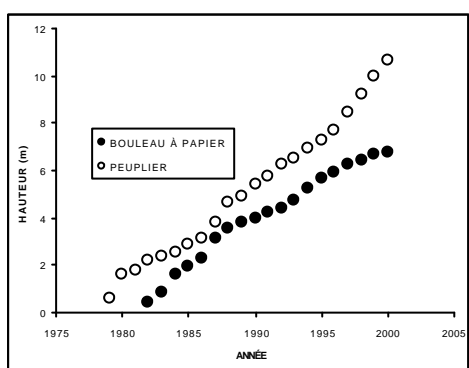
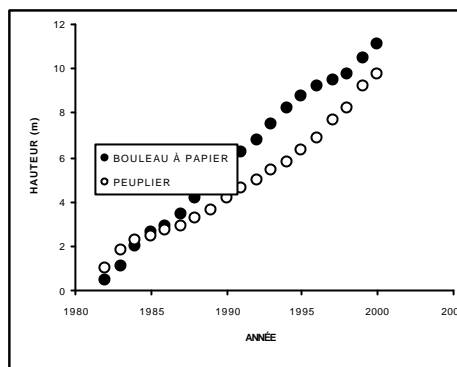
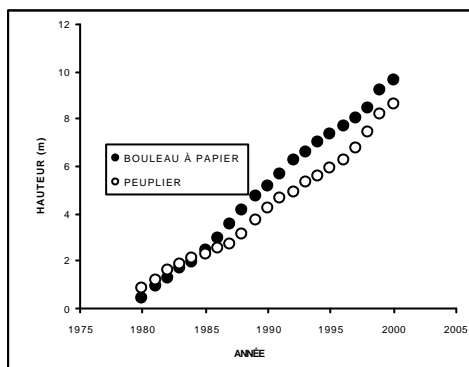


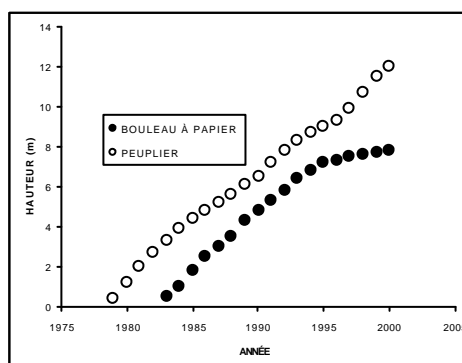
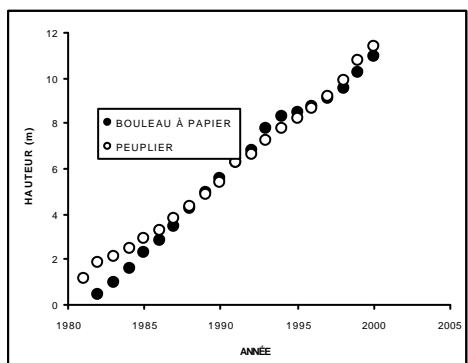
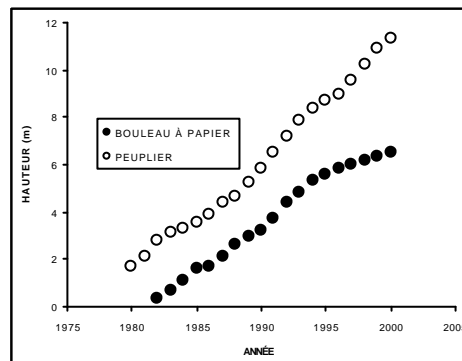
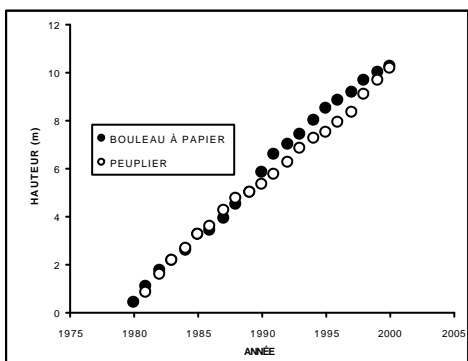
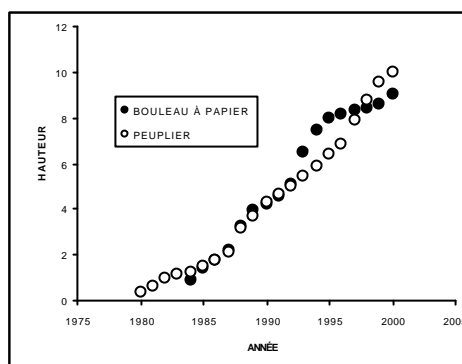
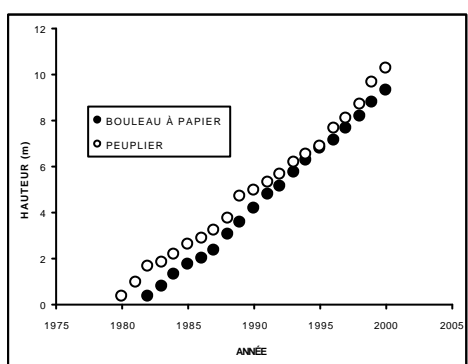
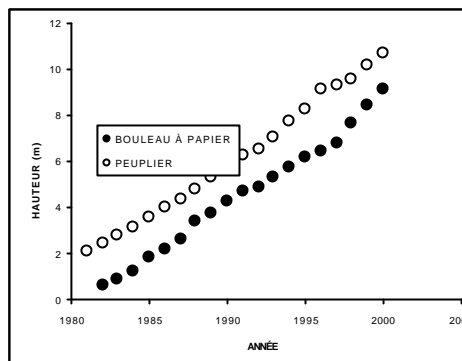
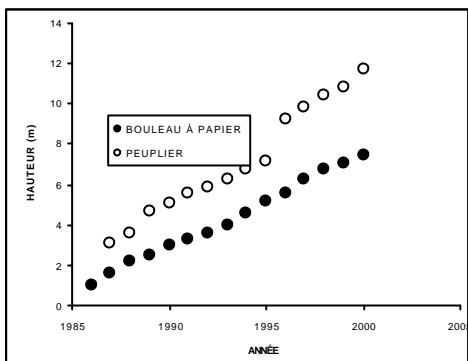


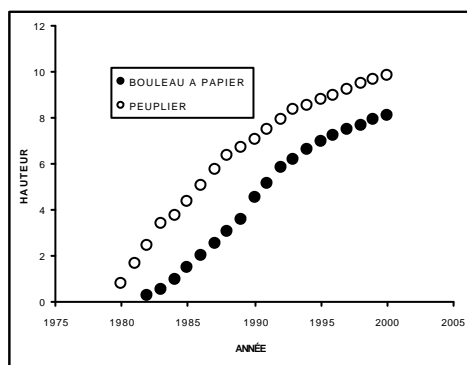
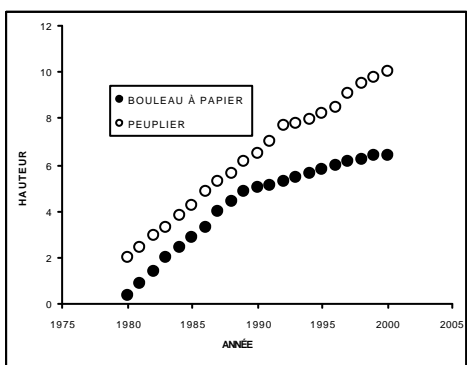
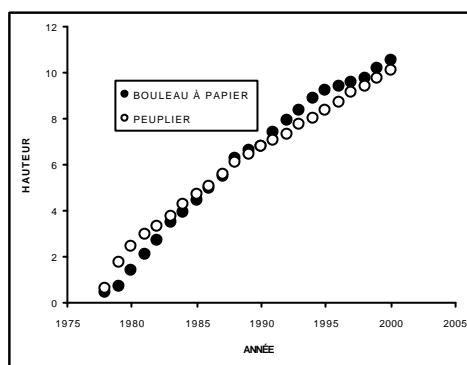
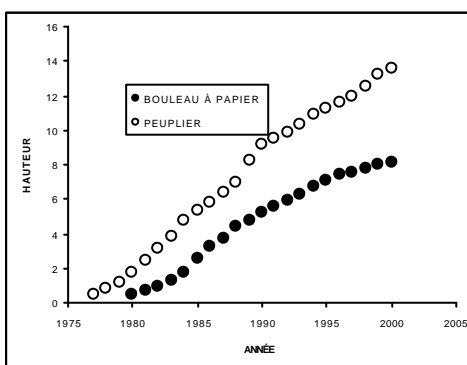
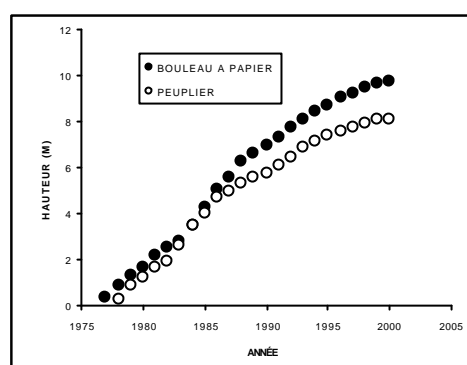
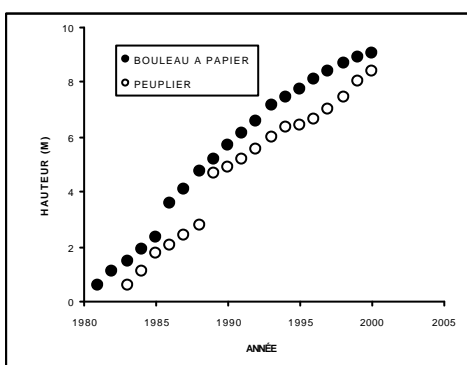
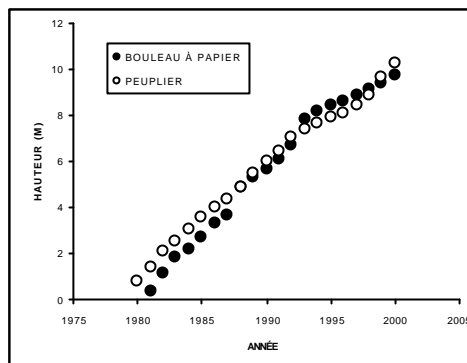
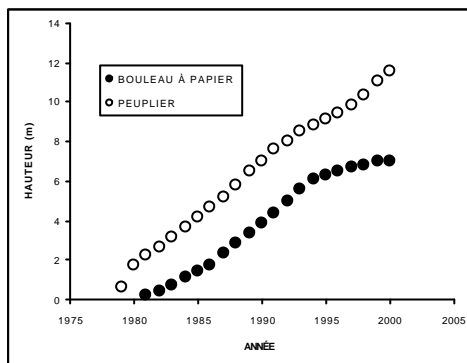












Annexe 2

Tableaux d'analyse de covariance

Annexe 2 : Analyses de covariance**a) Analyse de covariance, bouleaux dominants**

- Modèle "10 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G10 = 0$ si âge ≤ 10 et $G10 = 1$ si âge > 10

Source	Type III ΣC	2	DL	<u>2.1</u> Moy. des carrés	2.1.1 F	Pr > F
Model corrigé	5806,838		139	41,776	878,615	0,000
Ordonnée à l'origine	1,012		1	1,012	21,294	0,000
arbre	32,328		34	0,951	19,997	0,000
G10	23,205		1	23,205	488,043	0,000
âge	1092,492		1	1092,492	22976,932	0,000
arbre*G10	15,186		34	0,447	9,394	0,000
G10*âge	18,331		1	18,331	385,541	0,000
arbre*âge	40,847		34	1,201	25,267	0,000
arbre*G10*âge	16,110		34	0,474	9,966	0,000
Erreur	25,676		540	4,755E-02		
Total	25800,239		680			
Total corrigé	5832,514		679			

$R^2 = 0,996$

- Modèle "11 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G11 = 0$ si âge ≤ 11 et $G11 = 1$ si âge > 11

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr > F
Model corrigé	5809,713	139	41,796	989,869	0,000
Ordonnée à l'origine	2,693	1	2,693	63,768	0,000
arbre	28,480	34	0,838	19,838	0,000
G11	24,077	1	24,077	570,206	0,000
âge	1101,299	1	1101,299	26082,137	0,000
arbre*G11	15,082	34	0,444	10,505	0,000
G11*âge	22,976	1	22,976	544,145	0,000
arbre*âge	39,865	34	1,173	27,769	0,000
arbre*G11*âge	17,271	34	0,508	12,031	0,000
Erreur	22,801	540	4,222 ^E -02		
Total	25800,239	680			
Total corrigé	5832,514	679			

$R^2 = 0,996$

- Modèle "12 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G12 = 0$ si âge ≤ 12 et $G12 = 1$ si âge > 12

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr $> F$
Model corrigé	5810,511	139	41,802	1025,948	0,000
Ordonnée à l'origine	3,714	1	3,714	91,150	0,000
arbre	24,608	34	0,724	17,763	0,000
G12	22,019	1	22,019	540,415	0,000
âge	984,756	1	984,756	24168,767	0,000
arbre*G12	14,142	34	0,416	10,208	0,000
G12*âge	25,633	1	25,633	629,119	0,000
arbre*âge	37,068	34	1,090	26,758	0,000
arbre*G12*âge	17,605	34	0,518	12,709	0,000
Erreur	22,002	540	4,074E-02		
Total	25800,239	680			
Total corrigé	5832,514	679			

$R^2 = 0,996$

- Modèle "13 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G13 = 0$ si âge ≤ 13 et $G13 = 1$ si âge > 13

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr $> F$
Model corrigé	5809,593	139	41,796	984,687	0,000
Ordonnée à l'origine	2,183	1	2,183	51,419	0,000
arbre	19,928	34	0,586	13,809	0,000
G13	14,072	1	14,072	331,524	0,000
âge	777,275	1	777,275	18312,258	0,000
arbre*G13	11,011	34	0,324	7,630	0,000
G13*âge	19,906	1	19,906	468,969	0,000
arbre*âge	34,895	34	1,026	24,180	0,000
arbre*G13*âge	15,395	34	0,453	10,668	0,000
Erreur	22,921	540	4,245E-02		
Total	25800,239	680			
Total corrigé	5832,514	679			

$R^2 = 0,996$

- Modèle "14 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G14 = 0$ si âge ≤ 14 et $G14 = 1$ si âge > 14

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr $> F$
Model corrigé	5809,584	139	41,796	984,314	0,000
Ordonnée à l'origine	0,769	1	0,769	18,103	0,000
arbre	16,255	34	0,478	11,260	0,000
G14	6,660	1	6,660	156,849	0,000
âge	535,417	1	535,417	12609,426	0,000
arbre*G14	8,417	34	0,248	5,830	0,000
G14*âge	10,912	1	10,912	256,988	0,000
arbre*âge	31,843	34	0,937	22,056	0,000
arbre*G14*âge	12,094	34	0,356	8,377	0,000
Erreur	22,929	540	4,246E-02		
Total	25800,239	680			
Total corrigé	5832,514	679			

$R^2 = 0,996$

- Modèle "15 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G15 = 0$ si âge ≤ 15 et $G15 = 1$ si âge > 15

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr $> F$
Model corrigé	5807,707	139	41,782	909,526	0,000
Ordonnée à l'origine	0,140	1	0,140	3,038	0,082
arbre	13,070	34	0,384	8,368	0,000
G15	2,336	1	2,336	50,856	0,000
âge	315,230	1	315,230	6862,041	0,000
arbre*G15	6,015	34	0,177	3,851	0,000
G15*âge	4,356	1	4,356	94,814	0,000
arbre*âge	26,096	34	0,768	16,708	0,000
arbre*G15*âge	8,435	34	0,248	5,401	0,000
Erreur	24,807	540	4,594 ^E -02		
Total	25800,239	680			
Total corrigé	5832,514	679			

$R^2 = 0,996$

- Modèle "16 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G16 = 0$ si âge ≤ 16 et $G16 = 1$ si âge > 16

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr $> F$
Model corrigé	5803,426	139	41,751	775,104	0,000
Ordonnée à l'origine	1,778E-02	1	1,778E-02	0,330	0,566
arbre	9,143	34	0,269	4,992	0,000
G16	0,667	1	0,667	12,391	0,000
âge	147,003	1	147,003	2729,083	0,000
arbre*G16	3,883	34	0,114	2,120	0,000
G16*âge	1,357	1	1,357	25,200	0,000
arbre*âge	18,292	34	0,538	9,988	0,000
arbre*G16*âge	5,089	34	0,150	2,779	0,000
Erreur	29,087	540	5,387E-02		
Total	25800,239	680			
Total corrigé	5832,514	679			

$R^2 = 0,995$

- Modèle "17 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G17 = 0$ si âge ≤ 17 et $G17 = 1$ si âge > 17

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr $> F$
Model corrigé	5796,679	139	41,703	628,434	0,000
Ordonnée à l'origine	2,458 ^E -03	1	2,458 ^E -03	0,037	0,847
arbre	5,725	34	0,168	2,537	0,000
G17	0,137	1	0,137	2,069	0,151
âge	44,014	1	44,014	663,257	0,000
arbre*G17	2,493	34	7,331 ^E -02	1,105	0,317
G17*âge	0,289	1	0,289	4,355	0,037
arbre*âge	11,227	34	0,330	4,976	0,000
arbre*G17*âge	2,946	34	8,664 ^E -02	1,306	0,119
Erreur	35,834	540	6,636 ^E -02		
Total	25800,239	680			
Total corrigé	5832,514	679			

$R^2 = 0,994$

b) Analyse de covariance, bouleaux dominés

- Modèle "10 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G10 = 0$ si âge ≤ 10 et $G10 = 1$ si âge > 10

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr $> F$
Model corrigé	2785,132	127	21,930	610,507	0,000
Ordonnée à l'origine	6,209E-02	1	6,209E-02	1,729	0,189
arbre	18,265	31	0,589	16,402	0,000
G10	21,514	1	21,514	598,930	0,000
âge	420,894	1	420,894	11717,122	0,000
arbre*G10	11,812	31	0,381	10,607	0,000
G10*âge	14,097	1	14,097	392,440	0,000
arbre*âge	15,014	31	0,484	13,483	0,000
arbre*G10*âge	14,627	31	0,472	13,135	0,000
Erreur	16,272	453	3,592E-02		
Total	13013,275	581			
Total corrigé	2801,404	580			

$R^2 = 0,994$

- Modèle "11 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G11 = 0$ si âge ≤ 11 et $G11 = 1$ si âge > 11

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr $> F$
Model corrigé	2787,334	127	21,948	706,639	0,000
Ordonnée à l'origine	0,990	1	0,990	31,887	0,000
arbre	17,772	31	0,573	18,458	0,000
G11	25,818	1	25,818	831,245	0,000
âge	469,329	1	469,329	15110,874	0,000
arbre*G11	10,843	31	0,350	11,262	0,000
G11*âge	22,235	1	22,235	715,899	0,000
arbre*âge	14,983	31	0,483	15,562	0,000
arbre*G11*âge	13,513	31	0,436	14,035	0,000
Erreur	14,070	453	3,106E-02		
Total	13013,275	581			
Total corrigé	2801,404	580			

$R^2 = 0,995$

- Modèle "12 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G12 = 0$ si âge ≤ 12 et $G12 = 1$ si âge > 12

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr > F
Model corrigé	2787,617	127	21,950	721,217	0,000
Ordonnée à l'origine	2,574	1	2,574	84,587	0,000
arbre	14,566	31	0,470	15,439	0,000
G12	26,272	1	26,272	863,248	0,000
âge	429,494	1	429,494	14112,162	0,000
arbre*G12	10,519	31	0,339	11,150	0,000
G12*âge	27,826	1	27,826	914,310	0,000
arbre*âge	11,909	31	0,384	12,622	0,000
arbre*G12*âge	12,720	31	0,410	13,482	0,000
Erreur	13,787	453	3,043 ^E -02		
Total	13013,275	581			
Total corrigé	2801,404	580			

$R^2 = 0,995$

- Modèle "13 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G13 = 0$ si âge ≤ 13 et $G13 = 1$ si âge > 13

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr > F
Model corrigé	2786,367	127	21,940	660,969	0,000
Ordonnée à l'origine	3,626	1	3,626	109,251	0,000
arbre	10,510	31	0,339	10,214	0,000
G13	22,812	1	22,812	687,240	0,000
âge	328,532	1	328,532	9897,468	0,000
arbre*G13	8,646	31	0,279	8,402	0,000
G13*âge	27,734	1	27,734	835,511	0,000
arbre*âge	9,907	31	0,320	9,628	0,000
arbre*G13*âge	11,190	31	0,361	10,874	0,000
Erreur	15,037	453	3,319E-02		
Total	13013,275	581			
Total corrigé	2801,404	580			

$R^2 = 0,995$

- Modèle "14 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G14 = 0$ si âge ≤ 14 et $G14 = 1$ si âge > 14

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr $> F$
Model corrigé	2784,556	127	21,926	589,514	0,000
Ordonnée à l'origine	3,685	1	3,685	99,075	0,000
arbre	6,479	31	0,209	5,619	0,000
G14	16,765	1	16,765	450,765	0,000
âge	211,471	1	211,471	5685,814	0,000
arbre*G14	6,395	31	0,206	5,547	0,000
G14*âge	21,980	1	21,980	590,970	0,000
arbre*âge	7,021	31	0,226	6,090	0,000
arbre*G14*âge	8,697	31	0,281	7,543	0,000
Erreur	16,848	453	3,719 ^E -02		
Total	13013,275	581			
Total corrigé	2801,404	580			

$R^2 = 0,994$

- Modèle "15 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G15 = 0$ si âge ≤ 15 et $G15 = 1$ si âge > 15

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr $> F$
Model corrigé	2782,561	127	21,910	526,741	0,000
Ordonnée à l'origine	3,081	1	3,081	74,065	0,000
arbre	3,348	31	0,108	2,596	0,000
G15	10,647	1	10,647	255,963	0,000
âge	112,495	1	112,495	2704,512	0,000
arbre*G15	3,893	31	0,126	3,019	0,000
G15*âge	14,320	1	14,320	344,268	0,000
arbre*âge	4,453	31	0,144	3,453	0,000
arbre*G15*âge	5,520	31	0,178	4,281	0,000
Erreur	18,843	453	4,160E-02		
Total	13013,275	581			
Total corrigé	2801,404	580			

$R^2 = 0,993$

- Modèle "16 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G16 = 0$ si âge ≤ 16 et $G16 = 1$ si âge > 16

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr $> F$
Model corrigé	2779,068	127	21,882	443,809	0,000
Ordonnée à l'origine	1,822	1	1,822	36,962	0,000
arbre	1,598	31	5,154 ^{E-02}	1,045	0,403
G16	5,177	1	5,177	105,002	0,000
âge	47,613	1	47,613	965,672	0,000
arbre*G16	2,411	31	7,779 ^{E-02}	1,578	0,027
G16*âge	6,998	1	6,998	141,934	0,000
arbre*âge	2,558	31	8,252 ^{E-02}	1,674	0,014
arbre*G16*âge	3,333	31	0,108	2,181	0,000
Erreur	22,336	453	4,931 ^{E-02}		
Total	13013,275	581			
Total corrigé	2801,404	580			

$R^2 = 0,992$

- Modèle "17 ans"

Variable dépendante = h_{bop} $G17 = 0$ si âge ≤ 17 et $G17 = 1$ si âge > 17

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr $> F$
Model corrigé	2773,332	127	21,837	352,396	0,000
Ordonnée à l'origine	0,710	1	0,710	11,458	0,001
arbre	0,764	31	2,466 ^{E-02}	0,398	0,999
G17	1,659	1	1,659	26,774	0,000
âge	12,655	1	12,655	204,219	0,000
arbre*G17	1,244	31	4,011 ^{E-02}	0,647	0,930
G17*âge	2,201	1	2,201	35,526	0,000
arbre*âge	1,413	31	4,557 ^{E-02}	0,735	0,851
arbre*G17*âge	1,695	31	5,467 ^{E-02}	0,882	0,652
Erreur	28,072	453	6,197 ^{E-02}		
Total	13013,275	581			
Total corrigé	2801,404	580			

$R^2 = 0,990$

c) Analyse de covariance, peuplier

- Modèle "12 ans"

Variable dépendante = h_{pet} $G12 = 0$ si âge ≤ 12 et $G12 = 1$ si âge > 12

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr > F
Model corrigé	9157,364	267	34,297	660,734	0,000
Ordonnée à l'origine	23,303	1	23,303	448,925	0,000
arbre	72,573	66	1,100	21,184	0,000
G12	9,557 ^{E-02}	1	9,557 ^{E-02}	1,841	0,175
âge	1834,558	1	1834,558	35342,629	0,000
arbre*G12	45,982	66	0,697	13,422	0,000
G12*âge	1,036	1	1,036	19,954	0,000
arbre*âge	81,707	66	1,238	23,850	0,000
arbre*G12*âge	43,088	66	0,653	12,577	0,000
Erreur	51,596	994	5,191 ^{E-02}		
Total	56737,841	1262			
Total corrigé	9208,961	1261			

$R^2 = 0,994$

- Modèle "15 ans"

Variable dépendante = h_{pet} $G15 = 0$ si âge ≤ 15 et $G15 = 1$ si âge > 15

Source	Type III ΣC	DL	Moy. des carrés	F	Pr > F
Model corrigé	9160,988	267	34,311	710,924	0,000
Ordonnée à l'origine	0,555	1	0,555	11,490	0,001
arbre	45,496	66	0,689	14,283	0,000
G15	4,436	1	4,436	91,904	0,000
âge	1048,947	1	1048,947	21734,310	0,000
arbre*G15	35,514	66	0,538	11,149	0,000
G15*âge	3,098	1	3,098	64,183	0,000
arbre*âge	67,447	66	1,022	21,174	0,000
arbre*G15*âge	43,998	66	0,667	13,813	0,000
Erreur	47,973	994	4,826E-02		
Total	56737,841	1262			
Total corrigé	9208,961	1261			

$R^2 = 0,995$