

Étude de la relation du ratio hauteur/diamètre avec la croissance et l'âge des gaules en peuplements feuillus dégradés

Rapport présenté par :

Philippe Nolet, B. Sc., M. Sc

Éric Forget, ing.f., M. Sc.

Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue



À

M. Ronald Brizard, ing. f.
Forêt Québec U.G. 73-74

et

M. Clément Giasson, ing. f.
Bowater produits forestiers du Canada Inc.

Mai 2003

Remerciements

Nous tenons en premier lieu à souligner le travail diligent de Christine Boyer et de Claudine Boucher, des Conseillers Forestiers de l'Outaouais, lors de la récolte des échantillons. Nous voulons aussi souligner l'excellent travail réalisé par Martin Poirier lors du traitement et de la mesure des échantillons et par Srdjan Ostojic pour la compilation des données. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude reflètent bien la qualité des travaux terrain et de laboratoire réalisés.

Nos remerciements s'adressent également au ministère des Ressources naturelles pour le financement de ce projet par le biais de son Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier (PMVRMF) Volet I, ainsi qu'à Bowater produits forestiers du Canada pour leur appui au projet. Nous tenons aussi à remercier Alain Brazeau de nous avoir permis d'utiliser le territoire de Kenauk pour la récolte des échantillons.

Résumé

120 tiges (40 par essence) ont été sélectionnées dans des bandes coupées à blanc entre 1988 et 1990 dans la MRC de Papineau. De ces tiges, une série de disques transversaux ont été récoltés et des mesures de hauteur relevées. Les disques ont ensuite été séchés et sablés, puis la largeur de tous les cernes (sur trois axes) a été mesurée. Afin d'évaluer si le ratio H/D est un bon indicateur de la croissance à venir, la relation entre deux périodes de trois ans et deux périodes de cinq ans et le ratio H/D juste avant ces périodes a été analysée. Pour chacune des trois essences et pour les trois années d'analyses réalisées plus de cinq années après la coupe, les ratios H/D constituent de très bons indicateurs de la croissance en diamètre (R^2 variant de 0,72 à 0,83). Ces relations sont le mieux représentées par des régressions polynomiales par morceaux (linéaire-linéaire), dont le point d'intersection entre les deux droites constitue un seuil. Le taux de croissance moyen des tiges dont le H/D se situe au-dessous du seuil est de deux à trois fois plus élevé que celles ayant un H/D au-delà du seuil. Pour les trois essences et pour la majorité des tiges analysées, le H/D des tiges a tendance à augmenter dans le temps. Ce dernier résultat est important car il implique que le seuil du ratio H/D varie non seulement en fonction de l'essence mais aussi selon le stade de développement des tiges. L'analyse de la croissance des tiges en fonction de leur âge révèle des résultats surprenants : les tiges les plus vieilles (donc celles établies avant la coupe) de frêne d'Amérique et de bouleau jaune offrent une croissance en diamètre statistiquement moins élevée que les tiges les plus jeunes, alors qu'une tendance semblable est observée pour l'érable.

Une méthodologie est présentée afin de permettre l'utilisation du ratio H/D pour évaluer la croissance des tiges dans des peuplements qui proviennent d'une perturbation sévère comme c'est le cas des peuplements échantillonnés dans le cadre de cette étude (coupe par bandes). D'une part, il faut s'assurer que l'intervention a eu lieu depuis un minimum de 5 ou 6 années afin que les tiges se soient acclimatées à leur nouvelle situation de croissance. D'autre part, la principale difficulté dans l'utilisation du ratio H/D lorsqu'il y a un couvert forestier important réside dans l'évaluation de la relation mathématique entre le ratio H/D et la croissance.

Table des matières

REMERCIEMENTS	I
RÉSUMÉ	II
TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES TABLEAUX	V
INTRODUCTION	1
MÉTHODOLOGIE	3
ÉCHANTILLONNAGE ET PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS	3
ANALYSE DES DONNÉES	4
Ratio H/D vs croissance	4
Évolution du ratio H/D en fonction de l'âge.....	6
Croissance en fonction de l'âge	6
RÉSULTATS ET DISCUSSION	7
RATIO H/D VS CROISSANCE	7
Frêne d'Amérique	7
Le Bouleau jaune	10
Érable à sucre	13
ÉVOLUTION DU RATIO H/D EN FONCTION DE L'ÂGE	16
CROISSANCE EN FONCTION DE L'ÂGE.....	18
UTILISATION DU RATIO H/D.....	21
NOMBRE DE PLACETTES DE RÉGÉNÉRATION NÉCESSAIRES	21
L'échantillonnage préliminaire	22
L'échantillonnage complémentaire.....	22
L'UTILISATION DU RATIO H/D DANS LES PEUPELEMENTS AVEC UN COUVERT FORESTIER IMPORTANT.....	23
CONCLUSION	24
PLUSIEURS CONCLUSIONS IMPORTANTES ÉMERGENT DE LA PRÉSENTE ÉTUDE :.....	24
RÉFÉRENCES	25
ANNEXE 1	I

Liste des figures

Figure 1. Description schématisée de la prise d'échantillons sur le terrain.....	5
Figure 2. Relation entre le ratio H/D en 1999 et la croissance en diamètre pour la période 2000-2002 pour le frêne d'Amérique.	7
Figure 3. Relation entre le ratio H/D en 1997 et la croissance en diamètre pour la période 1998-2002 pour le frêne d'Amérique.	8
Figure 4. Relation entre le ratio H/D en 1996 et la croissance en diamètre pour la période 1997-1999 pour le frêne d'Amérique.	9
Figure 5. Relation entre le ratio H/D en 1992 et la croissance en diamètre pour la période 1993-1997 pour le frêne d'Amérique.	9
Figure 6. Relation entre le ratio H/D en 1999 et la croissance en diamètre pour la période 2000-2002 pour le bouleau jaune.	11
Figure 7. Relation entre le ratio H/D en 1997 et la croissance en diamètre pour la période 1998-2002 pour le bouleau jaune.	11
Figure 8. Relation entre le ratio H/D en 1996 et la croissance en diamètre pour la période 1997-1999 pour le bouleau jaune.	12
Figure 9. Relation entre le ratio H/D en 1992 et la croissance en diamètre pour la période 1993-1997 pour le bouleau jaune.	13
Figure 10. Relation entre le ratio H/D en 1999 et la croissance en diamètre pour la période 2000-2002 pour l'érable à sucre.	14
Figure 11. Relation entre le ratio H/D en 1997 et la croissance en diamètre pour la période 1998-2002 pour l'érable à sucre.	14
Figure 12. Relation entre le ratio H/D en 1996 et la croissance en diamètre pour la période 1997-1999 pour l'érable à sucre.	15
Figure 13. Relation entre le ratio H/D en 1992 et la croissance en diamètre pour la période 1993-1997 pour l'érable à sucre.	16
Figure 14. Hauteur des tiges en fonction du ratio H/D pour le frêne d'Amérique	17
Figure 15. Hauteur des tiges en fonction du ratio H/D pour le bouleau jaune.....	17
Figure 16. Hauteur des tiges en fonction du ratio H/D pour l'érable à sucre.....	18
Figure 17. Seuils du ratio H/D en fonction de l'année de mesure identifiés pour le frêne d'Amérique, le bouleau jaune et l'érable à sucre.....	18
Figure 18. Croissance en diamètre pour la période 2000-2002 en fonction de l'âge des tiges à hauteur de souche pour le frêne d'Amérique (FRA), le bouleau jaune (BOJ) et l'érable à sucre (ERS).....	20
Figure 19. Croissance en diamètre pour la période 2000-2002 en fonction du ratio H/D en 1999.....	20

Liste des tableaux

- Tableau 1. Nombre de placettes de régénération à effectuer selon le stocking obtenu suite à un inventaire préliminaire..... 23*
- Tableau 2. Équations et coefficients de corrélation de la croissance en fonction de l'année de mesure du ratio H/D, de la période de croissance pour le frêne d'Amérique, le bouleau jaune et l'érable à sucre..... I*

Introduction

Dans un rapport remis à la direction régionale de l'Outaouais du ministère des Ressources naturelles, l'Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue (IQAFF) définissait et caractérisait divers types de forêt dégradées (Sabbagh et al. 2002). Cette caractérisation des forêts était basée à la fois sur des critères écologiques et économiques des forêts feuillus de l'Outaouais. Entre autres, le potentiel des strates forestières pour la production de matière ligneuse a été défini en considérant l'abondance de la régénération présente dans les placettes temporaires. Or, l'abondance de la régénération nous renseigne peu sur la dynamique de la régénération dans les peuplements forestiers. D'une part, cette abondance ne nous renseigne pas sur la croissance de la régénération et par le fait même sur les gaules qui constitueront les peuplements futurs. D'autre part, l'abondance de la régénération ne nous informe pas de la qualité de cette régénération.

Il aurait été intéressant de procéder à un inventaire afin de caractériser la régénération de certains types de forêts dégradées en termes de dynamisme et de qualité. Cela était d'ailleurs notre première intention. Cependant, nous nous sommes rapidement aperçus que nous ne disposons pas des outils nécessaires pour caractériser le dynamisme de la régénération des forêts dégradées. Récemment, dans le cadre de travaux entrepris dans les régions de l'Outaouais, de la Montérégie, et de Mauricie, Forget et collaborateurs (2002a) ont développé un outil d'aide à la décision pour l'éclaircie précommerciale. Cet outil est basé sur le ratio hauteur/diamètre (H/D) des tiges à dégager, indice lié à la hiérarchisation sociale des tiges (Ouellet et Zarnovican, 1988). Ce ratio est un indicateur du niveau de compétition actuel et passé que subie une tige au cours de son existence, et est reconnu dans la littérature comme un paramètre potentiellement utile pour la prise de décision concernant les éclaircies (Smith et al., 1986). En effet, la compétition affecte davantage la croissance en diamètre que la croissance en hauteur de telle sorte qu'une tige subissant une forte compétition présentera un ratio H/D plus élevé qu'une tige subissant une faible compétition.

Ainsi, le ratio hauteur diamètre peut permettre de caractériser la vitesse de croissance de la régénération dans les forêts dégradées. Pour cela, il faut définir une relation

mathématique entre le ratio H/D et la croissance des tiges, et ce, pour les différentes essences d'intérêt. Pour que le ratio hauteur diamètre soit utile, il faut que l'outil :

- 1) puisse être utilisé pour plusieurs essences;
- 2) puisse être utilisé à différents stades de développement des gaules. Il faut pour cela déterminer comment le ratio H/D évolue avec la croissance des tiges.

Le premier objectif de ce projet est de déterminer dans quelle mesure le ratio H/D est un bon indicateur de croissance en diamètre, et ce, pour trois essences reconnues comme étant très différentes en termes de tolérance à l'ombre, soit le frêne d'Amérique, le bouleau jaune et l'érable à sucre. Le second objectif vise à définir, pour chacune de ces essences, comment le ratio H/D évolue avec le temps ou l'âge des tiges.

Méthodologie

Échantillonnage et préparation des échantillons

120 tiges (40 par essence) ont été sélectionnées dans des bandes coupées entre 1988 et 1990 sur le territoire de Kenauk dans la MRC de Papineau. Afin de s'assurer que les tiges récoltées n'aient pas été influencées par les arbres matures des interbandes adjacentes, la récolte a été réalisée dans la partie centrale de la bande seulement, c'est-à-dire à une distance d'au moins 10 mètres de l'interbande. Les bandes coupées avaient généralement une largeur d'environ 40 mètres. Afin de s'assurer d'obtenir gradient suffisant d'individus en terme d'historique de croissance, 10 tiges par classe de DHP (2-4, 4-6, 6-8, 8-10 cm) ont été sélectionnées. Ces tiges ne présentaient pas de défauts mécaniques majeurs, n'arboraient pas de présence de broutage visible et se trouvaient dans un environnement de compétition (gaules au pourtour). Un maximum de deux individus par classe d'essence-DHP ont été sélectionnés par bande. Afin de s'assurer de l'indépendance des tiges sélectionnées, une distance minimale égale à une hauteur d'arbre a été respectée entre celles-ci. Enfin, toutes les tiges sélectionnées se trouvaient sur un dépôt de till épais bien drainé.

Toutes les tiges sélectionnées ont été abattues et une série de disques transversaux (galettes) ont été récoltés et des données prises selon des spécifications précises. La hauteur (1 cm près) et le DHP (1 mm près) ont d'abord été notés. Une galette était récoltée juste en dessous de chacun des cinq dernières cicatrices du bourgeon terminal dans le but de reconstituer la croissance en hauteur de l'arbre. La distance moyenne entre les bourgeons terminaux des cinq dernières années a été utilisée comme mesure pour récolter des galettes de manière équidistante à partir du 5^{ème} bourgeon terminale jusqu'à la base de l'arbre. Par exemple, pour une tige dont la croissance en hauteur moyenne des cinq dernières années est de 50 cm, une galette sera récoltée à tous les 50 cm le long de la tige. Enfin, une galette a été prise de façon systématique à hauteur de souche, soit à 15 cm de hauteur. L'ensemble de ces mesures est présentée de façon schématique à la Figure 1.

Toutes les galettes récoltées ont été sablées. La largeur de tous les cernes (sur trois axes) de la majorité des galettes a été mesurée à l'aide d'un vernier électronique et d'un

binoculaire. Pour les tiges dont le nombre de galettes excédait de beaucoup l'âge de l'arbre, l'analyse a été réalisée sur toutes les galettes présentant 13 cernes et moins (donc jusqu'à l'année 1990) et une galette sur deux pour le reste de la tige. La galette prise à 15 cm de hauteur a été systématiquement analysée.

Analyse des données

Ratio H/D vs croissance

Afin d'évaluer si le ratio H/D est un bon indicateur de la croissance à venir, nous avons étudié, pour chaque essence, quatre périodes de croissance en relation avec le ratio H/D juste avant cette période. Les relations étudiées sont donc les suivantes :

- Ratio H/D en 1999 *versus* la croissance en diamètre pour la période 2000-2002
- Ratio H/D en 1997 *versus* la croissance en diamètre pour la période 1998-2002
- Ratio H/D en 1996 *versus* la croissance en diamètre pour la période 1997-1999
- Ratio H/D en 1992 *versus* la croissance en diamètre pour la période 1993-1997

Nous avons ainsi étudié deux périodes de trois ans et deux périodes de cinq ans à différents moments de l'évolution des peuplements.

L'analyse visuelle a permis de confirmer que, comme l'avaient constaté Forget et al. (2002a), la relation entre le ratio H/D et la croissance en diamètre est constituée de deux relations linéaires de pente différente. Pour la plupart des relations et pour chaque essence, nous avons donc utilisé la procédure « polynomiale par morceaux » de NCSS (Hintze 1999) qui permet à la fois d'établir une relation entre deux séries de données et d'identifier le point d'intersection des deux droites. Les coefficients de R^2 présentés sont des pseudo- R^2 issus de cette même régression polynomiale.

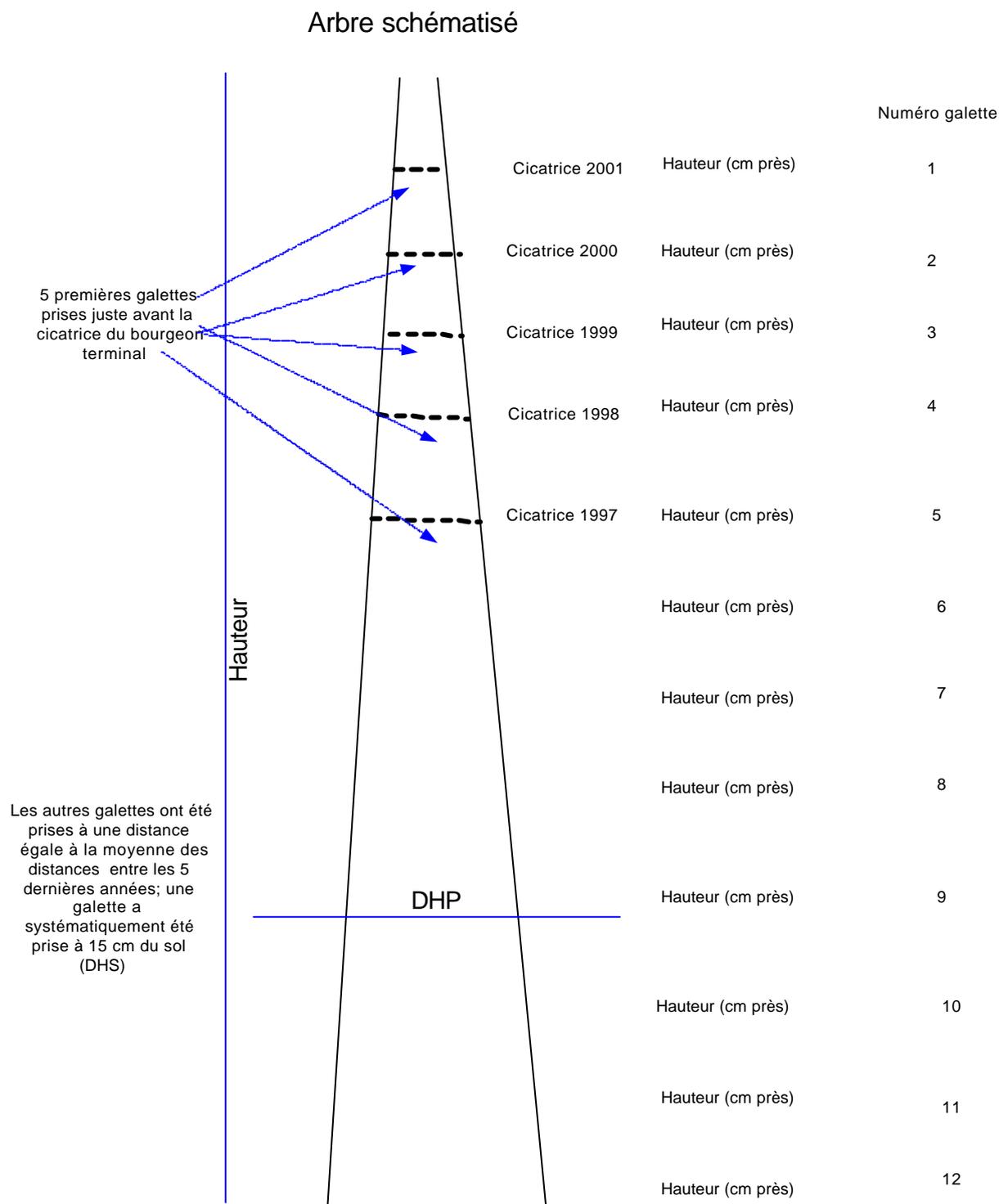


Figure 1. Description schématisée de la prise d'échantillons sur le terrain

Évolution du ratio H/D en fonction de l'âge

Les résultats montrent que la valeur-seuil du ratio H/D varie en fonction du temps, c'est-à-dire en fonction de l'âge des tiges, pour chacune des trois essences. Ce constat nous mène à nous interroger sur la pérennité de la valeur prédictive du ratio H/D. Pour vérifier cela, nous avons, pour chaque essence, vérifié l'évolution du ratio H/D en fonction du temps pour trois tiges respectivement représentatives d'un H/D faible, moyen et élevé.

Croissance en fonction de l'âge

Nos analyses préliminaires ont démontré qu'une partie des individus échantillonnés s'étaient établis bien avant la coupe alors que d'autres tiges se sont établies juste avant ou juste après la coupe. Nous avons donc vérifié, par un test-t unilatéral, s'il existe une différence dans la croissance en diamètre pour la période 2000-2002 entre les tiges de ces deux cohortes. L'âge utilisé pour séparer ces deux groupes d'âge a été estimé visuellement et indépendamment pour chacune des trois essences.

Résultats et discussion

Ratio H/D vs croissance

Frêne d'Amérique

Le ratio H/D en 1999 constitue un très bon indicateur de la croissance en diamètre observée de 2000 à 2002 ($R^2 = 0,83$; $p < 0,01$), contrairement aux résultats obtenus par Forget et al. (2002) dans une étude semblable. La relation non-significative obtenue dans cette dernière étude peut s'expliquer par la plus grande hétérogénéité au niveau de la qualité des sites échantillonnés, par la grande étendue des âges des peuplements, et par un nombre plus restreint de tiges analysées. L'analyse des données effectuée permet d'identifier une valeur-seuil du ratio H/D de 1,42 au-dessus duquel la croissance en diamètre est extrêmement faible (Figure 2). En dessous de cette valeur seuil, la croissance en diamètre augmente très rapidement, passant d'une croissance moyenne de 2,4 mm/an à une croissance de plus 7,5 mm/an. Les équations des différentes régressions sont disponibles à l'Annexe 1 (Tableau 2).

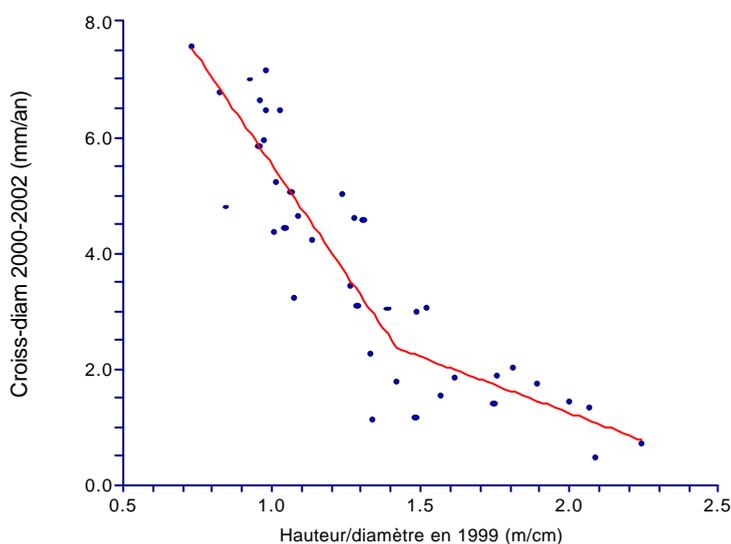


Figure 2. Relation entre le ratio H/D en 1999 et la croissance en diamètre pour la période 2000-2002 pour le frêne d'Amérique.

Le ratio H/D en 1997 constitue également un très bon indicateur de la croissance en diamètre observée sur les cinq années subséquentes (1998-2002; $R^2= 0,80$; $p < 0,01$). Le fait que la relation calculée avec cinq années de croissance soit presque aussi forte que celle calculée avec années de croissance indique que pour le frêne d'Amérique, la valeur prédictive du ratio H/D pour la croissance est relativement longue (5 ans). La valeur seuil du ratio H/D est passée de 1,42 en 1999 à 1,29 (Figure 3).

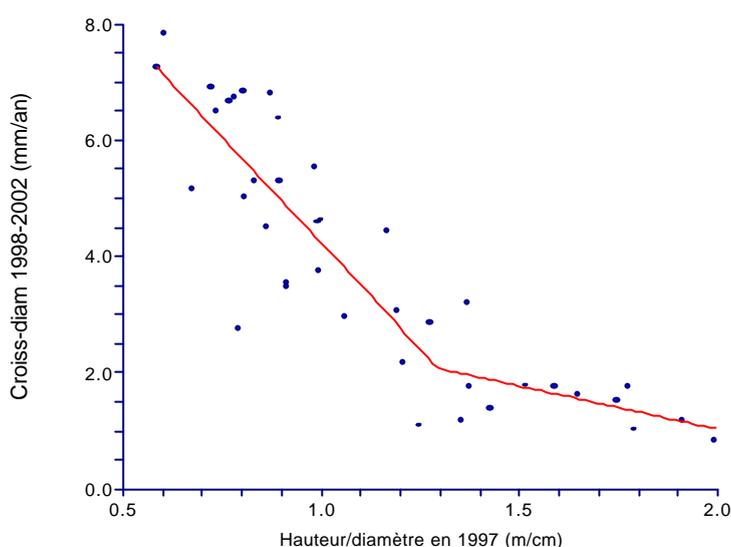


Figure 3. Relation entre le ratio H/D en 1997 et la croissance en diamètre pour la période 1998-2002 pour le frêne d'Amérique.

Nous obtenons des relations semblables pour le ratio H/D en 1996 en fonction de la croissance en diamètre observée dans les trois années subséquentes ($R^2= 0,80$; $p < 0,01$). La valeur-seuil du ratio H/D obtenue pour 1996 est de 1,19 (Figure 4) comparativement à 1,29 pour 1997 et 1,29 pour 1999.

La relation entre le ratio H/D en 1992 et la croissance observée dans les cinq années subséquentes (1993-1997) est beaucoup moins faible que celle observée pour les autres périodes ($R^2= 0,66$; $p < 0,01$). En fait, les conditions d'applications pour l'analyse de régression ne sont pas remplies de façon très satisfaisante; il faut donc interpréter les résultats (R^2 et équations) de cette analyse prudemment. La valeur-seuil du ratio H/D passe de 1,19 à 0,78 de 1996 à 1992 (Figure 5).

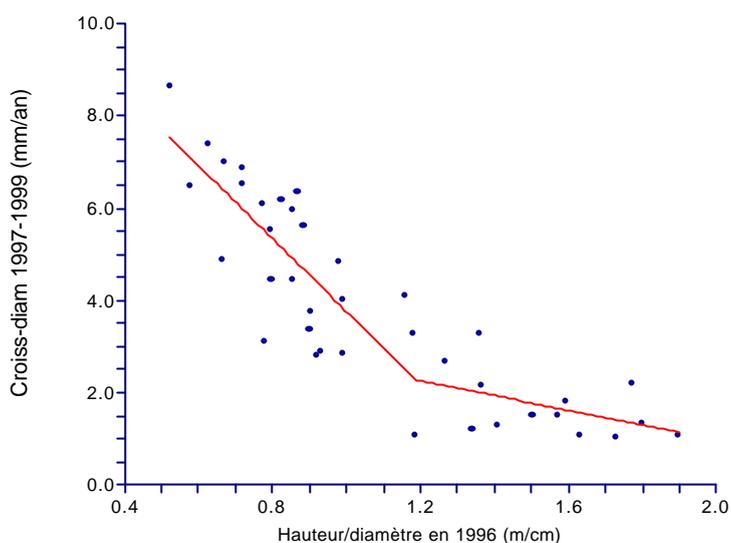


Figure 4. Relation entre le ratio H/D en 1996 et la croissance en diamètre pour la période 1997-1999 pour le frêne d'Amérique.

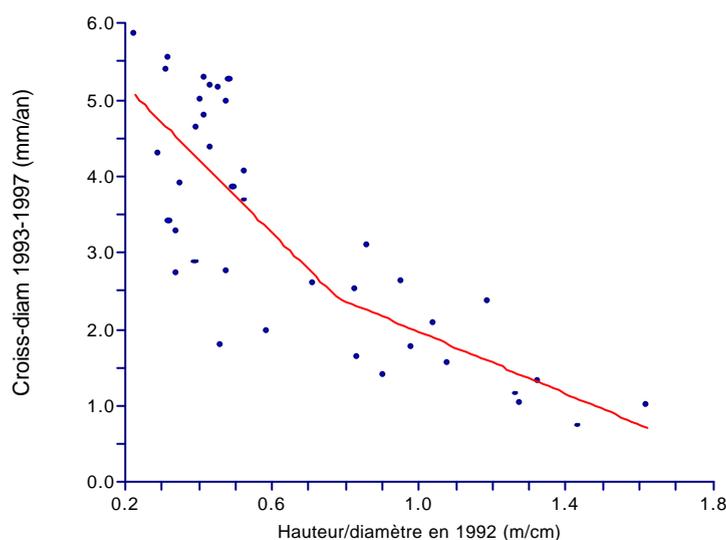


Figure 5. Relation entre le ratio H/D en 1992 et la croissance en diamètre pour la période 1993-1997 pour le frêne d'Amérique.

La moins bonne relation H/D-croissance obtenue pour 1992 comparativement aux autres années étudiées peut s'expliquer en partie par le court laps de temps écoulé (2 à 4 ans) entre cette période de mesure et la coupe (par bandes). En effet, les tiges n'auraient pas encore adapté leur morphologie et leur croissance au nouvel environnement créé par la coupe. Cela nous mènent donc à mentionner qu'il faut être prudent dans l'utilisation du

ratio H/D pour le frêne d'Amérique s'il est utilisé dans un court laps de temps après intervention. En effet, les résultats indiquent que le ratio H/D n'est pas un indicateur de la croissance aussi précis dans les années suivant une perturbation majeure. Puisque la cicatrice terminale n'est visible que pour les dernières années de croissance, la valeur de hauteur de l'arbre utilisée pour le calcul du ratio H/D en 1992 a été estimée à partir des galettes, cette estimation contribuant sans doute à diminuer légèrement la force de la relation. En comparaison, pour les autres années, la hauteur était mesurée directement sur la tige.

Nos résultats démontrent pour le frêne d'Amérique que le ratio H/D constitue un très bon indicateur de la croissance à venir s'il est utilisé plus de cinq ans après traitement. D'autres analyses seraient nécessaires pour déterminer précisément à partir de laps de temps après traitement l'utilisation du ratio H/D peut être utilisé avec confiance. La croissance moyenne en diamètre maximale se situe autour de 8 mm/an pour l'ensemble des périodes étudiées.

Le Bouleau jaune

Le ratio H/D en 1999 constitue un bon indicateur de la croissance en diamètre observée de 2000 à 2002 ($R^2 = 0,75$; $p < 0,01$) pour le bouleau jaune, légèrement meilleur que la relation observée par Forget et al (2002) pour cette même essence. La relation moins forte obtenue dans cette dernière étude peut s'expliquer par une plus grande hétérogénéité au niveau de la qualité des sites échantillonnés, par une grande diversité en termes d'âge de peuplements, et par un nombre plus restreint de tiges. On observe une valeur-seuil du ratio H/D de 1,33 au dessus duquel la croissance en diamètre est faible. Au dessus de cette valeur-seuil observée, la croissance en diamètre augmente très rapidement pour passer approximativement d'une croissance moyenne de moins de 2 mm/an au niveau du seuil à une croissance de plus de 8 mm/an.

Le ratio H/D en 1997 constitue également un très bon indicateur de la croissance en diamètre observée sur les cinq années subséquentes (1998-2002; $R^2 = 0,84$; $p < 0,01$). Cela nous indique que pour le bouleau jaune, la valeur prédictive du ratio H/D pour la croissance peut être relativement longue (5 ans). La valeur seuil du ratio H/D pour 1997

est 0,97 comparativement à 1,33 en 1999. La valeur maximale de la croissance moyenne en diamètre annuelle atteint plus de 9 mm/an.

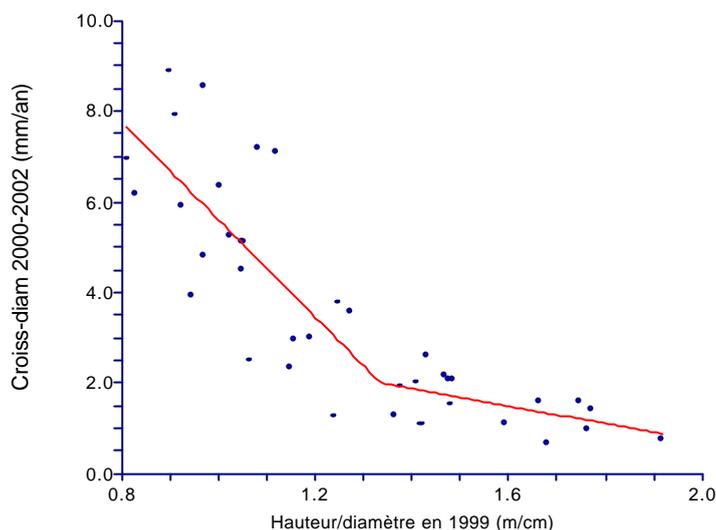


Figure 6. Relation entre le ratio H/D en 1999 et la croissance en diamètre pour la période 2000-2002 pour le bouleau jaune.

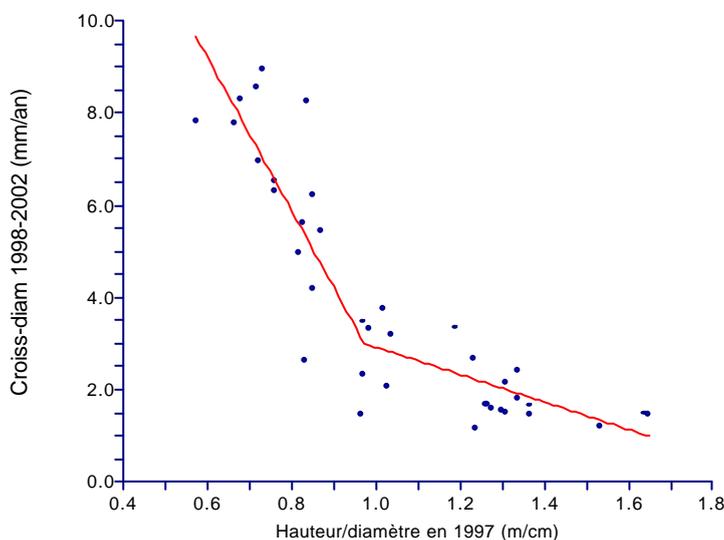


Figure 7. Relation entre le ratio H/D en 1997 et la croissance en diamètre pour la période 1998-2002 pour le bouleau jaune.

Pour le ratio H/D en 1996 nous obtenons une relation avec la croissance en diamètre des trois années subséquentes de force semblable à celle de 1997 et 1999 ($R^2 = 0,78$; $p <$

0,01). La valeur-seuil du ratio H/D change légèrement passant de 0,97 pour l'année 1997 à 0,94.

La relation entre le ratio H/D en 1992 et la croissance observée dans les cinq années subséquentes (1993-1997), bien que significative, est beaucoup moins fiable que celle observée pour les autres périodes ($R^2 = 0,38$; $p < 0,01$). En fait, les conditions d'application pour l'analyse de régression ne sont pas remplies de façon rigoureuse; il faut donc interpréter les résultats (R^2 et équations) de cette analyse prudemment. La valeur-seuil du ratio H/D pour l'année 1992 est de 0,78. La croissance moyenne annuelle maximale pour la période 1993-1997 est de 7 mm/an alors qu'elle était de 9 mm/an pour les autres périodes étudiées.

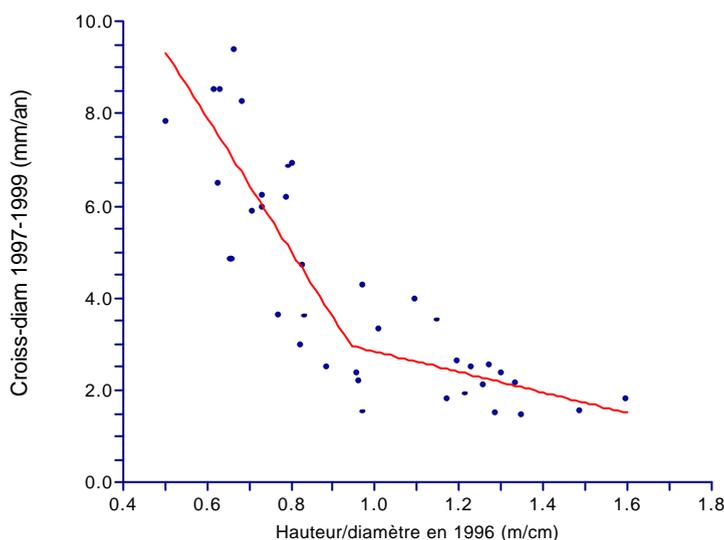


Figure 8. Relation entre le ratio H/D en 1996 et la croissance en diamètre pour la période 1997-1999 pour le bouleau jaune.

Puisque la relation du H/D mesuré en 1992 avec la croissance est moins fiable que pour les années 1996 et suivantes, nous proposons, comme pour le frêne d'Amérique, de ne pas utiliser l'indice dans les cinq ou six ans suivant une perturbation majeure. Les équations des différentes régressions sont disponibles à l'Annexe 1 (Tableau 2).

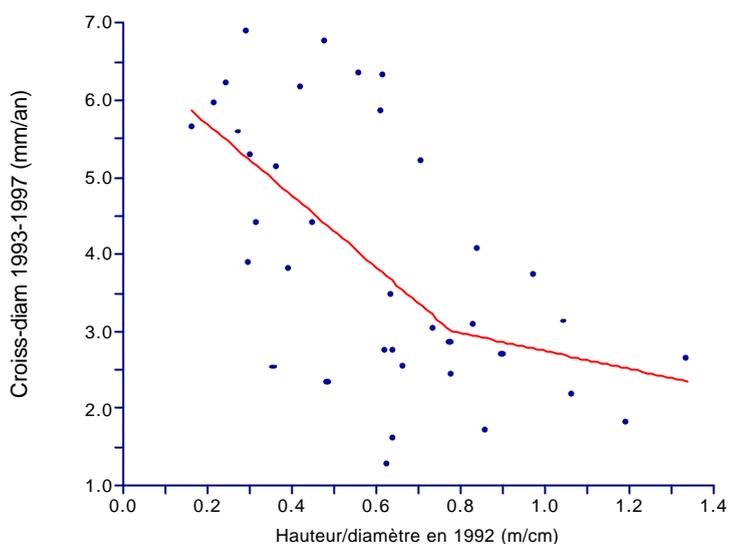


Figure 9. Relation entre le ratio H/D en 1992 et la croissance en diamètre pour la période 1993-1997 pour le bouleau jaune.

Érable à sucre

Le ratio H/D en 1999 constitue un très bon indicateur de la croissance en diamètre observée de 2000 à 2002 ($R^2=0,81$; $p < 0,01$) pour l'érable à sucre. Forget et al. (2002) avaient également observé une relation significative, quoique légèrement plus faible ($R^2=0,69$). On observe une valeur-seuil du ratio H/D de 1,11 au-dessus de laquelle la croissance en diamètre est faible. Au-dessus de cette valeur-seuil, la croissance en diamètre augmente très rapidement pour passer d'une croissance moyenne de 2,0 mm/an à une croissance de 7,5 mm/an. Une tige présente même une croissance annuelle moyenne de près de 1 cm/an.

Le ratio H/D en 1997 constitue également un très bon indicateur de la croissance en diamètre observée sur les cinq années subséquentes (1998-2002; $R^2=0,77$; $p < 0,01$). Cela nous indique que, comme pour les deux autres essences étudiées, la valeur prédictive du ratio H/D pour la croissance peut être relativement longue (5 ans). La valeur seuil du ratio H/D pour 1997 est de 1,04 comparativement à 1,11 en 1999. La valeur maximale de la croissance moyenne en diamètre annuelle atteint 9 mm/an.

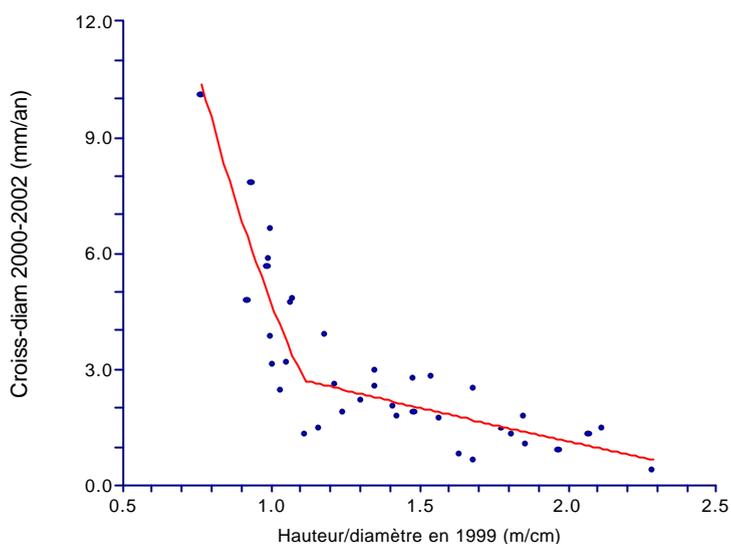


Figure 10. Relation entre le ratio H/D en 1999 et la croissance en diamètre pour la période 2000-2002 pour l'érable à sucre.

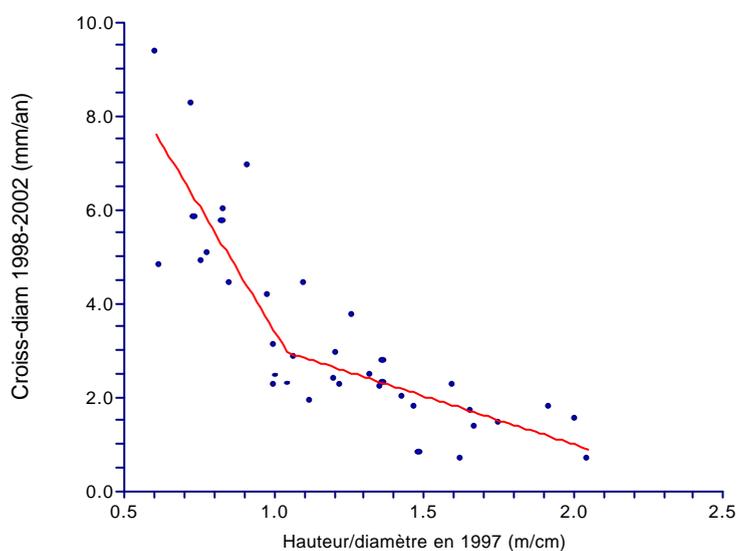


Figure 11. Relation entre le ratio H/D en 1997 et la croissance en diamètre pour la période 1998-2002 pour l'érable à sucre.

Nous obtenons également, pour le ratio H/D en 1996, une très bonne relation avec la croissance en diamètre observée dans les trois années subséquentes ($R^2 = 0,72$; $p < 0,01$). La valeur-seuil du ratio H/D est de 1,05, très près de celle de l'année 1997.

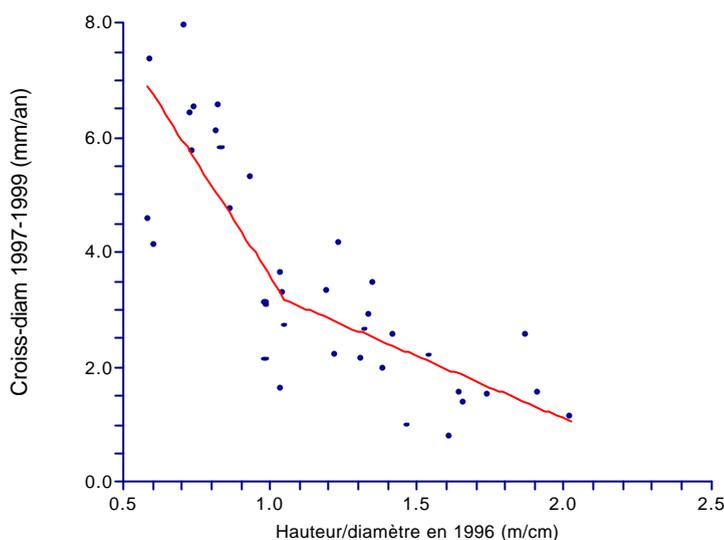


Figure 12. Relation entre le ratio H/D en 1996 et la croissance en diamètre pour la période 1997-1999 pour l'érable à sucre.

Comme pour les autres essences, la relation entre le ratio H/D en 1992 et la croissance observée dans les cinq années subséquentes (1993-1997) est beaucoup moins fiable que celle observée pour les autres périodes ($R^2 = 0,38$; $p < 0,01$). Encore une fois, les conditions d'application pour l'analyse de régression ne sont pas remplies de façon rigoureuse; il faut donc interpréter les résultats (R^2 et équations) de cette analyse prudemment. La valeur-seuil du ratio H/D pour l'année 1992 n'a changé que très légèrement, passant de 1,04 et 1,05 pour 1997 et 1996 à 0,99. Le seuil pour l'érable à sucre en fonction du temps semble beaucoup plus stable que pour les deux autres essences étudiées. Comme pour le bouleau jaune, la croissance moyenne annuelle maximale pour la période 1993-1997 est de 7 mm/an alors qu'elle était de 9 mm/an pour les autres périodes étudiées.

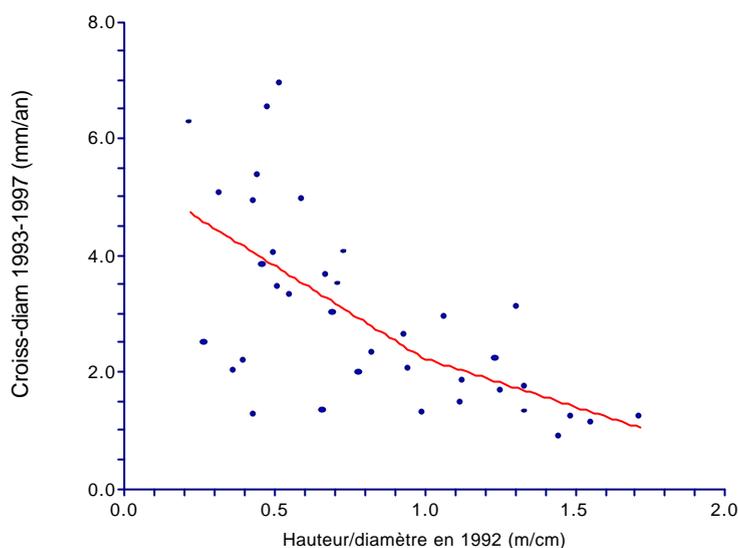


Figure 13. Relation entre le ratio H/D en 1992 et la croissance en diamètre pour la période 1993-1997 pour l'érable à sucre.

Évolution du ratio H/D en fonction de l'âge

L'âge des tiges de chacune des trois essences échantillonnées varie, à quelques exceptions près, entre 12 à 28 ans à hauteur de souche. Pour la majorité des tiges analysées, nous remarquons que le H/D des tiges a tendance à augmenter dans le temps. La relation entre ces deux variables est linéaire et la pente différente de 0. (Figures 14 à 16). Ce résultat est extrêmement important, car il implique que l'on ne peut fournir un seul ratio H/D idéal pour une essence donnée, puisque les ratios évoluent dans le temps. Cette relation entre l'année de mesure du ratio et le ratio H/D nous aide à comprendre pourquoi Forget et al. (2002) n'avaient pas obtenu des relations très satisfaisantes entre le ratio H/D et la croissance en diamètre pour le bouleau jaune et le frêne d'Amérique en échantillonnant des peuplements d'âges différents. Ainsi, puisque la valeur prédictive du ratio H/D varie en fonction du temps, il était presque impossible pour eux d'obtenir de bonnes relations entre le ratio H/D et la croissance en diamètre.

Les seuils de ratio H/D identifiés varient également en fonction de l'âge de mesure du ratio (Figure 17).

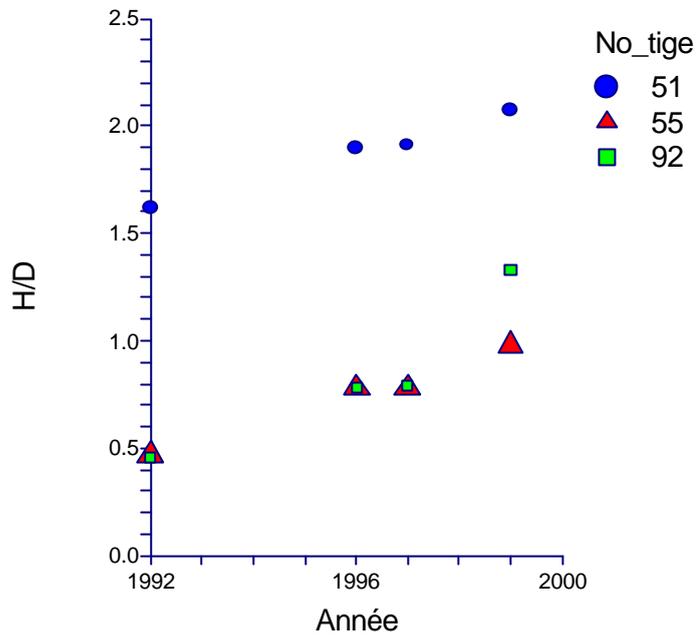


Figure 14. Hauteur des tiges en fonction du ratio H/D pour le frêne d'Amérique

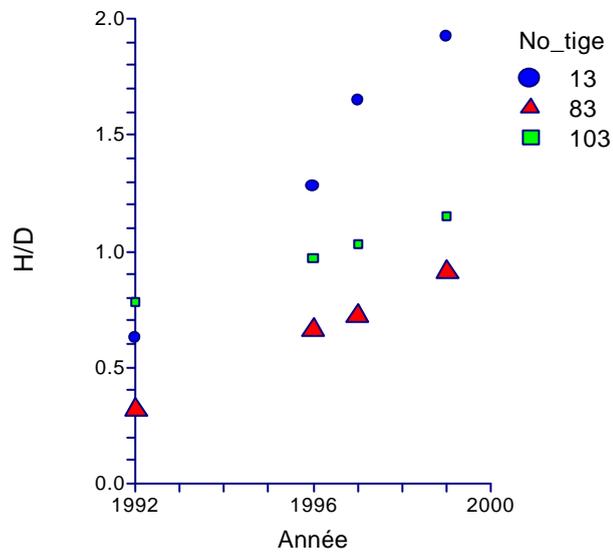


Figure 15. Hauteur des tiges en fonction du ratio H/D pour le bouleau jaune

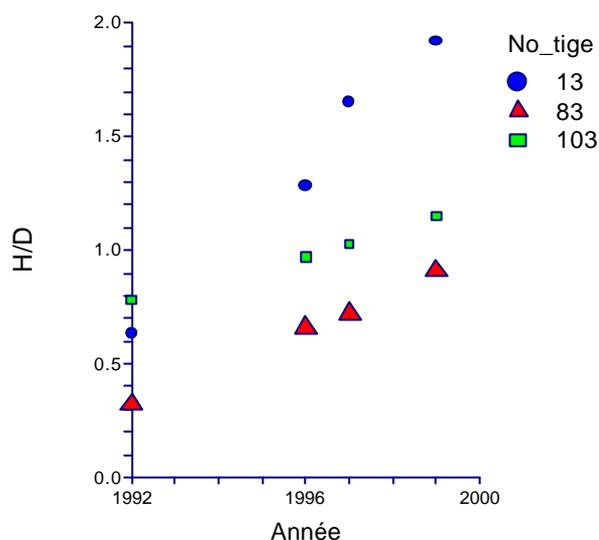


Figure 16. Hauteur des tiges en fonction du ratio H/D pour l'érable à sucre

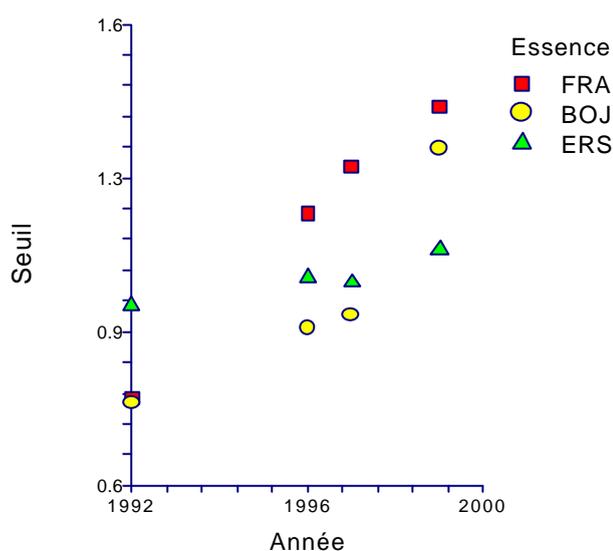


Figure 17. Seuils du ratio H/D en fonction de l'année de mesure identifiés pour le frêne d'Amérique, le bouleau jaune et l'érable à sucre

Croissance en fonction de l'âge

Une proportion importante des individus que nous avons échantillonnés s'étaient établis bien avant la coupe totale (1988 à 1990). Logiquement, nous nous attendions à ce que ces individus soient dominants et présentent la meilleure croissance. Nous avons vérifié cela pour les trois essences. Pour le frêne d'Amérique et le bouleau jaune, nous arrivons à un

résultat surprenant : les tiges les plus vieilles offrent une croissance en diamètre statistiquement moins élevée que les tiges les plus jeunes. Pour le frêne d'Amérique, les tiges de 13 ans et moins présentent une croissance moyenne de 4,57 mm/an alors qu'elle est de 2,94 mm/an (test-t unilatéral; $p = 0,006$) pour les tiges de plus de 13 ans (pour la période 2000-2002) (Figure 18). Pour le bouleau jaune, la croissance des tiges de moins de 17 ans présentent une croissance moyenne de 4,18 mm/an alors que les tiges de plus de 17 ans présentent une croissance de 2,38 mm/an (test-t unilatéral; $p = 0,004$). Pour l'érable, les tiges de moins de 20 ans présentent une croissance moyenne de 3,62 mm/an alors que les tiges plus vieilles présentent une croissance de 2,50 mm/an. Cette différence n'est pas cependant pas statistiquement significative, mais on peut la qualifier de tendance (tes-t; $p = 0,08$). Ces résultats sont à la fois surprenants et intéressants. Il est en effet difficile d'expliquer pourquoi les tiges établies plusieurs années avant la coupe ne parviennent pas à obtenir un croissance aussi forte que les tiges plus jeunes. Cela pourrait s'expliquer par le fait que ces tiges ont évolué sous un environnement fortement compétitionné et auraient développé une stratégie et une architecture de croissance adaptées à cette situation. On peut poser l'hypothèse que les tiges qui ont été trop longtemps sous cet environnement de compétition ne soient pas capable de changer de stratégie et/ou d'architecture et de s'adapter au nouvel environnement. Il est aussi intéressant de noter que ces arbres, même sans avoir une croissance optimale, peuvent se retrouver parmi les gaules dominantes d'un peuplement. Ainsi, une gaule dominante avec une croissance moyenne (ratio H/D intermédiaire) peut côtoyer une gaule plus petite, mais avec une croissance supérieure (H/D supérieur). Dans un tel cas, le sylviculteur devrait privilégier la gaule avec une croissance supérieure.

Enfin, il est important de mentionner que la relation ratio H/D croissance n'est pas dépendante de l'âge des tiges, et ce, pour toutes les essences. Par exemple pour le frêne d'Amérique, on veut voir à la Figure 19 que les tiges plus vieilles sont bien réparties d'un de chaque côté de la courbe.

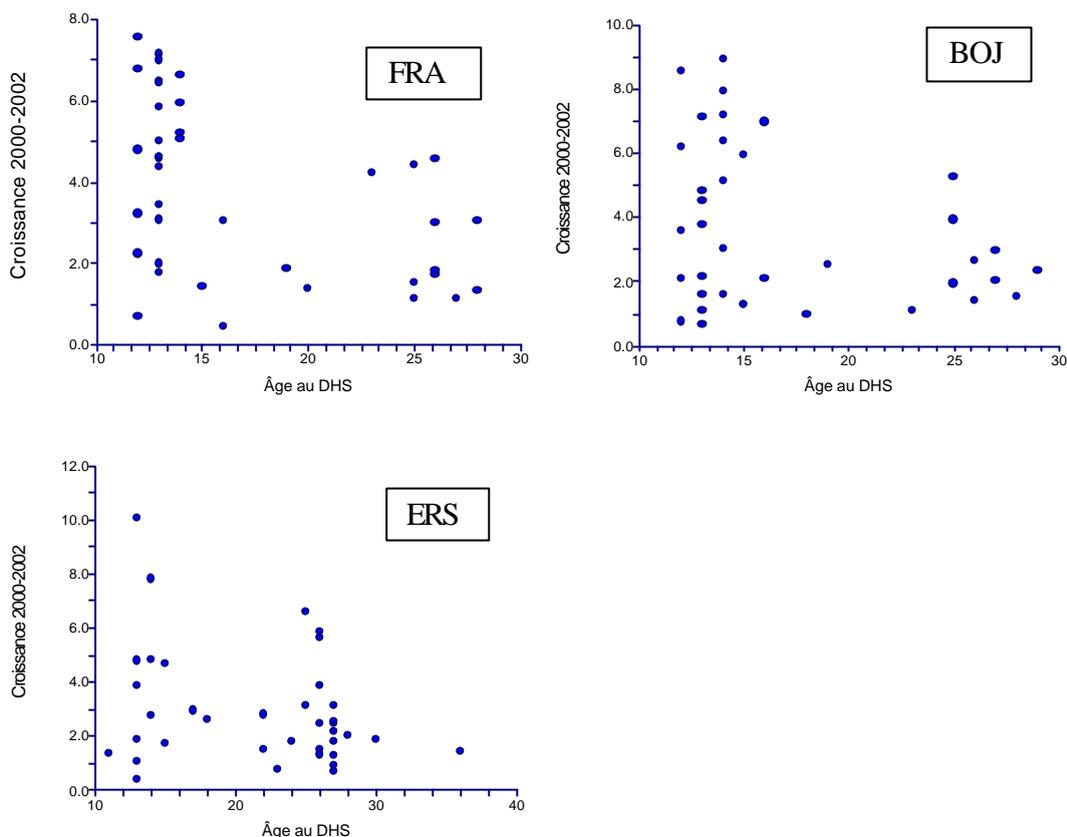


Figure 18. Croissance en diamètre pour la période 2000-2002 en fonction de l'âge des tiges à hauteur de souche pour le frêne d'Amérique (FRA), le bouleau jaune (BOJ) et l'érable à sucre (ERS).

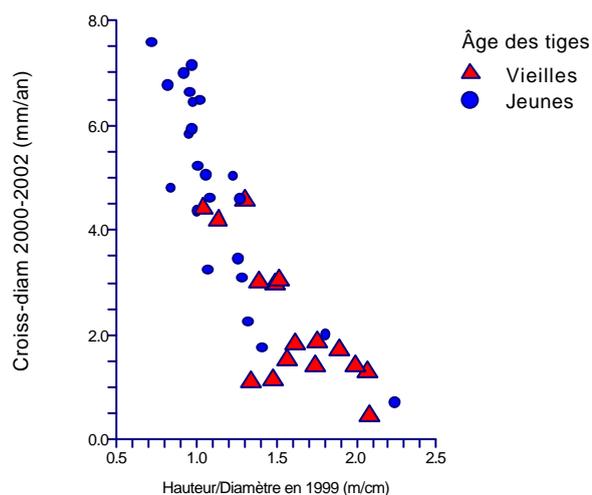


Figure 19. Croissance en diamètre pour la période 2000-2002 en fonction du ratio H/D en 1999.

Utilisation du ratio H/D

Le ratio H/D varie, comme on l'a vu, en fonction de l'espèce et du temps. De plus, ce ratio varie certainement en fonction de la qualité de site, car il a déjà été démontré que le défilement (ratio H/D) des arbres est plus élevé sur les sites pauvres et dans les climats moins favorables. Dans un tel contexte, le sylviculteur peut se demander comment utiliser le ratio H/D de façon fiable. Nous proposons, que lors de son inventaire, le forestier mesure le ratio H/D et la croissance en diamètre d'une quinzaine d'arbres par espèce désirée répartis dans les différentes classes de diamètre présentes sur le site. Cette estimation de la croissance peut se faire à l'aide d'une sonde Pressler ou plus rapidement à l'aide d'un marteau à échantillonner. Avec ces mesures, le forestier pourra estimer la relation mathématique entre la croissance (sur trois ans) et le ratio H/D. Cette relation pourra être trouvée par l'utilisation de la procédure « polynomiale par morceaux » du logiciel NCSS (Hintze 1999), ou estimée à partir de EXCEL avec l'option « insertion d'une courbe de tendance ». Dans le cas de cette estimation, nous proposons d'utiliser les courbes exponentielle ou polynomiale. Couplée à la méthode d'échantillonnage présentée par Forget et Doyon (2002b)¹, le forestier pourra déterminer dans quelle mesure les espèces et des tiges désirées se rapprochent ou s'éloignent de la croissance optimale.

Nombre de placettes de régénération nécessaires

Lorsque l'on fait de l'échantillonnage, deux objectifs concurrents sont poursuivis : a) obtenir une réponse précise à la question que l'on se pose et b) éviter de faire un échantillonnage excessif qui apporte peu en précision, mais qui est fort onéreux. Lorsque l'on effectue un inventaire de régénération, la principale question est la suivante : la proportion de placettes échantillonnées bien stockées est-elle suffisante pour rencontrer les objectifs de régénération ? Pour minimiser l'effort d'échantillonnage, nous suggérons d'établir des placettes d'une superficie égale à la formule suivante :

Nombre de placettes = 1 ha / (2* objectif de régénération en tiges/ha).

¹ Forget et Doyon proposent, pour chaque placette d'inventaire, d'évaluer le niveau de compétition et le potentiel de croissance à l'aide du ratio H/D. Aucune mesure de compétition ou de densité de tiges est nécessaire.

Par exemple, si l'objectif de régénération est de 400 tiges/ha, la superficie des placettes devrait être de $1 \text{ ha} / 800 = 12,5 \text{ m}^2$. De cette façon, on sait que si 50% ou plus des placettes sont bien stockées, l'objectif de régénération peut être rencontré sans avoir recours à la régénération artificielle.

Donc avec une telle approche, l'objectif de l'inventaire est de s'assurer que le stocking est d'au moins 50%. De là, il faut diviser l'inventaire en deux étapes : l'échantillonnage préliminaire et l'échantillonnage complémentaire. Cet inventaire devrait être fait de façon aléatoire. Le forestier a aussi intérêt à diviser les superficies d'échantillonnage en zone relativement homogènes. Si les superficies sont trop hétérogènes, il sera difficile d'obtenir des stockings élevés, ce qui par le fait même augmentera le nombre de placettes à effectuer.

L'échantillonnage préliminaire

L'échantillonnage préliminaire vise à déterminer le nombre de placettes qui devront être effectuées dans l'échantillonnage complémentaire pour s'assurer que le stocking est supérieur à 50%. Treize (13) placettes sont suffisantes dans le cadre de ce pré-échantillonnage. Plus le stocking du peuplement est élevé, plus le nombre de placettes à effectuer dans l'échantillonnage complémentaire sera faible. En fait, si le stocking du peuplement dépasse 75%, aucun autre échantillonnage est nécessaire, et cela, avec une précision de 95%.

L'échantillonnage complémentaire

Le Tableau 1 fournit le nombre de placettes à échantillonner selon les résultats obtenus lors de l'échantillonnage préliminaire. Le nombre de placettes à effectuer augmente rapidement à mesure que le stocking diminue. En fait, si le stocking est très près de 50%, il devient quasiment impossible de démontrer statistiquement qu'il rencontre les objectifs de régénération. Le forestier devrait fixer un nombre maximal de placettes à effectuer (ex. : 100). Si après l'échantillonnage complémentaire, le stocking s'avère moins élevée que celui obtenu dans l'échantillonnage préliminaire, il faut procéder à un autre échantillonnage complémentaire pour préciser le résultat. Par exemple, si l'échantillonnage préliminaire fournit un stocking de 70 %, le forestier devrait procéder à

l'inventaire de 5 autres placettes (13+5=18). Si après cet inventaire, le stocking est tombé à 65%, le forestier devrait effectuer 21 autres placettes (18+21=39).

Tableau 1. Nombre de placettes de régénération à effectuer selon le stocking obtenu suite à un inventaire préliminaire.

Stocking lors de l'échantillonnage préliminaire	Nombre de placettes total à effectuer (pré-échantillonnage et échantillonnage complémentaire) ¹
75	0
70	18
65	39
60	93
55	375

¹ Ce nombre assure avec une précision de 95% que le stocking correspondant obtenu est plus grand que 50%.

L'utilisation du ratio H/D dans les peuplements avec un couvert forestier important

Le ratio H/D peut être utilisé facilement dans les peuplements qui proviennent d'une perturbation sévère comme c'est le cas pour peuplements échantillonnés dans le cadre de cette étude (coupe par bandes). Le forestier peut se poser la question quant à la pertinence de cet outil dans le cas de coupes partielles (coupe à diamètre limite, coupe de jardinage, coupe progressive d'ensemencement) puisque la morphologie des tiges est influencée par le couvert. D'une part, il faut s'assurer que l'intervention a eu lieu depuis un minimum de 5 ou 6 années afin que les tiges se soient acclimatées à leur nouvelle situation de croissance. D'autre part, la principale difficulté dans l'utilisation du ratio H/D lorsqu'il y a un couvert forestier important réside dans l'évaluation de la relation mathématique entre le ratio H/D et la croissance. En présence d'un couvert important, il peut être difficile de trouver des tiges à leur optimal de croissance. Ainsi, lors de l'estimation mathématique de la croissance, le forestier ne pourra déterminer dans quelle mesure les tiges échantillonnées se rapprochent de la croissance optimale. Pour pallier à ce problème, le forestier devrait échantillonner des tiges des essences désirées sur des qualités de site semblables, mais en milieu ouvert ou se servir d'échantillons qu'il a déjà échantillonnés et qui se trouvaient sur des sites présentant ces caractéristiques de qualité de site et d'ouverture de peuplement.

Conclusion

Plusieurs conclusions importantes émergent de la présente étude :

- Le ratio H/D est un indicateur précis du niveau de compétition et de la croissance en diamètre future des tiges de frêne d'Amérique, de bouleau jaune et d'érable à sucre. Cet indicateur remplacerait avantageusement la densité des peuplements comme critère décisionnel relatif à l'éclaircie précommerciale en forêt de feuillus nobles.
- La régression polynomiale par morceaux (linéaire-linéaire) reflète le mieux la relation H/D-croissance. Le point d'intersection entre les deux droites constitue un seuil au-dessous duquel la croissance des tiges est de deux à trois fois plus élevée que celle des tiges ayant un H/D au-dessus du seuil.
- La relation entre le ratio H/D en 1992 et la croissance observée dans les cinq années subséquentes (1993-1997), bien que significative, est beaucoup moins fiable que celle observée pour les autres périodes. Le ratio H/D doit être utilisé avec prudence dans les cinq ou six années suivant une perturbation majeure.
- Le ratio H/D d'une tige a tendance à augmenter dans le temps. Ce résultat implique que l'on ne peut utiliser un seul ratio H/D pour une essence donnée sans tenir compte du stade de développement des tiges. L'utilisation du ratio H/D aurait avantage à être jumelée à un logiciel de compilation comme celui développé par Forget et Doyon (2002b).
- Les tiges les plus vieilles (donc celles établies avant la coupe) de frêne d'Amérique et de bouleau jaune offrent une croissance en diamètre statistiquement moins élevée que les tiges les plus jeunes. La même tendance a été observée pour l'érable.

Les renseignements amassés dans le cadre de cette étude auront permis d'améliorer notre compréhension du ratio hauteur/diamètre pour les essences feuillues du point de vue de la relation avec la croissance en diamètre. La méthodologie proposée permet d'évaluer avec efficacité et précision la croissance de gaules feuillus.

Références

Forget, E., F. Doyon et P. Nolet. 2002a. Guide de classification des peuplements feuillus selon leur potentiel de réponse à l'éclaircie précommerciale - Rapport de méthodologie. IQAFF. 22 p. + annexes.

Forget, E. et F. Doyon. 2002b. Guide de classification des peuplements feuillus selon leur potentiel de réponse à l'éclaircie précommerciale. IQAFF. 23 p. + annexes.

Hintze, J.L. 1999. NCSS 2000. Number cruncher statistical systems. Kaysville, Utah. 570 p.

Ouellet, D. et Zarnovican, R. 1988. Cultural treatment of young yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britton) stands : tree classification and stand structure. Canadian Journal of Forest Research 18 : p. 1581-1586.

Sabbagh, P., P. Nolet, F. Doyon et J.-F. Talbot. 2002. Classification et caractérisation des forêts dégradées de l'Outaouais. IQAFF. 46 pp. et annexes.

Smith, M.S. 1986. The practice of silviculture. Eighth edition. John Wiley & Sons. 527 p.

Annexe 1

Tableau 2. Équations et coefficients de corrélation de la croissance en fonction de l'année de mesure du ratio H/D, de la période de croissance pour le frêne d'Amérique, le bouleau jaune et l'érable à sucre

Essence	R ²	Année du ratio	Période de croissance	Équation au-dessus du seuil	Équation en-dessous du seuil	Seuil
FRA	0,83	1999	2000-2002	5,11-1,93 * H/D	13,04-7,52 * H/D	1,42
FRA	0,81	1997	1998-2002	4,00-1,49 * H/D	11,53-7,31* H/D	1,29
FRA	0,80	1996	1997-1999	4,19-1,60 * H/D	11,68-7,91 * H/D	1,19
FRA	0,66	1992	1993-1997	3,98-2,02 * H/D	6,14-4,80 * H/D	0,78
BOJ	0,75	1999	2000-2002	4,58-1,93 * H/D	16,34-10,74 * H/D	1,33
BOJ	0,84	1997	1998-2002	5,90-2,98 * H/D	19,22-16,69 * H/D	0,97
BOJ	0,78	1996	1997-1999	5,06-2,22 * H/D	16,60-14,47 * H/D	0,94
BOJ	0,38	1992	1993-1997	3,92-1,17 * H/D	6,63-4,66 * H/D	0,78
ERS	0,81	1999	2000-2002	4,95-2,13 * H/D	43,32-57,32 * H/D	1,11
ERS	0,77	1997	1998-2002	5,09-2,05 * H/D	14,03-10,63 * H/D	1,04
ERS	0,72	1996	1997-1999	5,46-2,18 * H/D	11,54-7,96 * H/D	1,05
ERS	0,42	1992	1993-1997	3,89-1,65 * H/D	5,41-3,20 * H/D	0,99