

**SÉBASTIEN MEUNIER**

**COMPARAISON DE LA RÉSISTANCE AU RENVERSEMENT DU SAPIN BAUMIER  
ET DE L'ÉPINETTE BLANCHE SUR SITE MÉSIQUE EN SAPINIÈRE BORÉALE**

Mémoire

présenté

à la Faculté des études supérieures

de l'Université Laval

pour l'obtention

du grade maître ès sciences (M.Sc.)

Département des sciences du bois et de la forêt

FACULTÉ DE FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE

UNIVERSITÉ LAVAL

SEPTEMBRE 2000

© Sébastien Meunier, 2000



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file Votre référence*

*Our file Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-56419-3

**Canada**

## REMERCIEMENTS

Je désire tout d'abord remercier mon directeur de maîtrise, M. Jean-Claude Ruel pour sa grande disponibilité et sa diligence dans le traitement des nombreuses demandes qui lui furent transmises tout au long de ces quelques années de maîtrise.

Je tiens aussi à remercier le *CRSNG* et Hydro-Québec pour leur participation respective au financement de ce projet; de même que l'AMBSQ, la Faculté de Foresterie et de Géomatique et la compagnie Abitibi-Consolidated, pour le soutien apporté sous forme de bourses, tout au long de ce projet.

Je tiens aussi à remercier tous les gens qui ont participé à la réalisation de ce projet, Alexis Achim, Martine Lapointe, Gisèle Silva et Sonia Watt pour la prise de données terrain, Jean-Paul Agnard et le Centre de Recherche en Géomatique pour leur support à l'analyse des images, ainsi que Gaston Laflamme et le Centre de Foresterie des Laurentides pour le traitement des échantillons de racines.

En terminant, je désire remercier ma plus fidèle lectrice pour son support, ses commentaires précieux et ses suggestions pertinentes qui m'ont permis d'affiner ce texte et de mieux vous exprimer mes idées.

## RÉSUMÉ

Chaque année au Québec, le chablis entraîne des pertes de matière ligneuse considérables, principalement au sein des peuplements d'essences résineuses. Malheureusement, il existe peu de données disponibles concernant la résistance au renversement de ces essences, et ce malgré le fait qu'une meilleure connaissance de la dynamique du chablis pourrait orienter les aménagistes vers de meilleures pratiques sylvicoles. Dans cette optique, la présente étude a pour but 1) d'évaluer la résistance au renversement du sapin baumier et de l'épinette blanche sur site mésique et 2) de calculer la vitesse critique engendrant le chablis chez ces deux essences. Afin de déterminer quelles caractéristiques de l'arbre expliquaient le mieux la variabilité du moment critique ( $M_c$ ) associé au renversement, des régressions linéaires simples ont été réalisées avec différentes variables dendrométriques de la tige. Parmi ces régressions, seules celles impliquant la hauteur totale entraînent un moment critique significativement plus élevé chez l'épinette blanche. Cette différence peut s'expliquer par des rapports  $H/D$  (hauteur/diamètre à hauteur de poitrine) différents chez ces deux essences et un poids de cime plus important chez le sapin baumier. Les résultats de notre étude suggèrent que pour minimiser les pertes par chablis en sapinière boréale, les interventions sylvicoles sur site mésique devraient favoriser une plus forte proportion d'épinette blanche à l'intérieur du peuplement.



## TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale .....	1
1.1) Présentation du chablis.....	1
1.1.1) Définition.....	1
1.1.2) Importance des chablis.....	1
1.1.3) Catégories de chablis .....	2
1.1.4) Types de dommages causés par le vent .....	3
1.2) Résistance des tiges .....	4
1.2.1) Résistance mécanique.....	4
1.2.2) Comparaison de deux espèces établies sur un même site.....	5
1.2.3) Résistance du sapin baumier et de l'épinette blanche .....	6
Revue de la littérature .....	7
2.1) Facteurs influençant les risques de chablis .....	7
2.1.1) Le climat .....	7
2.1.2) La topographie .....	8
2.1.3) Le sol.....	9
2.1.4) Le peuplement.....	10
2.1.4.1) Densité et structure du peuplement.....	10
2.1.4.2) Espèce .....	11
2.1.4.3) Hauteur et âge .....	11
2.1.4.4) Forme de la tige .....	12
2.1.4.5) Racines.....	12
2.2) Description des forces engendrées par le vent.....	13
2.2.1) Équilibre des forces .....	13
2.2.2) Forces entraînant le bris ou le renversement .....	15
2.2.2.1) Force due au vent.....	15
2.2.2.2) Poids de la partie aérienne .....	16
2.2.3) Forces s'opposant au bris ou au renversement.....	16
2.2.3.1) Résistance du sol à la fracture et poids de la motte .....	16
2.2.3.2) Résistance à la tension et à l'arrachement des racines .....	16

2.2.3.3) Résistance à la flexion des racines et du sol .....	17
2.3) Description des espèces étudiées .....	17
2.3.1) Sapin baumier .....	18
2.3.1.1) Écologie .....	18
2.3.1.2) Résistance au renversement .....	19
2.3.1.3) Susceptibilité à la carie .....	20
2.3.2) Épinette blanche.....	22
2.3.2.1) Écologie .....	22
2.3.2.2) Résistance au renversement .....	23
2.3.2.3) Susceptibilité à la carie .....	24
2.4) Études antérieures pour simuler l'action du vent.....	24
2.4.1) Modèle statique.....	25
Résistance au renversement chez le sapin baumier et l'épinette blanche .....	30
3.1) Introduction.....	30
3.2) Méthodologie .....	31
3.2.1) Localisation de la recherche .....	31
3.2.2) Sélection des sites .....	33
3.2.3) Description des sites .....	34
3.2.3.1) Peuplements .....	34
3.2.3.2) Sol .....	34
3.2.3.3) Qualité de station .....	35
3.2.4) Méthodologie de treillage .....	36
3.2.4.1) Provenance de la méthode et ajustements effectués .....	36
3.2.4.2) Hypothèses simplificatrices .....	36
3.2.4.3) Modèle mathématique.....	39
3.2.4.4) Adaptations du modèle en fonction du protocole utilisé .....	42
3.2.5) Description du matériel.....	43
3.2.5.1) Le treuil.....	43
3.2.5.2) La cellule de charge .....	44
3.2.5.3) L'acquisiteur de données.....	46
3.2.5.4) La caméra.....	46

3.2.5.5) L'étalon de référence.....	47
3.2.6) Prise des données terrain.....	47
3.2.6.1) Préparation des sites.....	47
3.2.6.2) Déroulement d'un essai .....	48
3.2.7) Prise de données en laboratoire .....	50
3.2.7.1) Calcul du centre de gravité des tiges .....	50
3.2.7.2) Échantillon de bois.....	51
3.2.7.3) Saisie vidéo .....	51
3.2.7.4) Redressement d'image.....	52
3.2.8) Analyses statistiques.....	59
3.2.9) Comparaison des droites de régression.....	61
3.3) Résultats pour l'épinette blanche .....	61
3.3.1) Description des échantillons treuillés .....	61
3.3.2) Analyses en laboratoire.....	62
3.3.2.1) Analyse des échantillons de bois .....	62
3.3.2.2) Calcul du centre de gravité .....	62
3.3.2.3) Redressement des images et calcul du moment critique ( $M_c$ ) .....	63
3.3.3) Analyses statistiques .....	64
3.3.3.1) Analyse du bris des tiges .....	64
3.3.3.2) Analyse de corrélation .....	65
3.3.3.3) Analyse graphique .....	66
3.3.3.4) Analyse des résidus.....	67
3.3.3.5) Régression linéaire simple .....	68
3.4) Résultats pour le sapin baumier.....	71
3.4.1) Description des échantillons et du treuillage .....	71
3.4.2) Analyses en laboratoire.....	72
3.4.2.1) Analyse des échantillons de bois .....	72
3.4.2.2) Calcul du centre de gravité .....	73
3.4.3) Analyses statistiques .....	74
3.4.3.1) Analyse du bris des tiges .....	74
3.4.3.2) Analyse de corrélation .....	75

3.4.3.3) Analyse graphique .....	76
3.4.3.4) Analyse des résidus.....	77
3.4.3.5) Régression linéaire simple .....	77
3.5) Comparaison des équations selon les espèces .....	80
3.6) Discussion.....	86
3.6.1) Considérations sur le modèle.....	86
3.6.1.1) Modèle statique.....	86
3.6.2) Considérations sur la méthodologie.....	87
3.6.2.1) Facteurs climatiques .....	87
3.6.2.2) Arbres voisins .....	88
3.6.2.3) Angle de treillage.....	89
3.6.2.4) Angle de l'enregistrement des images.....	89
3.6.2.5) Description du système racinaire.....	90
3.6.2.5) Échantillons de racines .....	91
3.6.3) Résultats obtenus .....	92
3.6.3.1) Âge des tiges.....	92
3.6.3.2) Caractéristiques moyennes des systèmes racinaires .....	92
3.6.3.3) Carie des racines .....	93
3.6.3.4) Hauteur du centre de gravité.....	94
3.6.3.5) Calcul du moment critique.....	95
3.6.3.6) Analyse du bris de tige.....	95
3.6.3.7) Analyse de corrélation .....	96
3.6.3.8) Analyse graphique .....	96
3.6.3.9) Analyse des résidus.....	97
3.6.3.10) Régression linéaire simple .....	97
3.6.3.11) Comparaisons interspécifiques .....	99
3.7) Conclusions.....	101
Vitesse associée au moment critique engendrant le chablis des tiges de sapin baumier et d'épinette blanche.....	103
4.1) Introduction.....	103
4.1.1) Mécanisme de transfert d'énergie.....	103

4.1.1.1) Vitesse du vent.....	104
4.1.1.2) Vent en bordure du peuplement.....	105
4.1.1.3) Vent dans le peuplement.....	106
4.1.2) Impact des coupes partielles sur la stabilité du peuplement .....	107
4.2) Méthodologie.....	107
4.2.1) Volume et densité de cime.....	108
4.2.1.1) Considérations mathématiques .....	108
4.2.1.2) Adaptation du modèle.....	110
4.3) Résultats.....	116
4.3.1) Caractéristiques de la cime .....	117
4.3.2) Vitesse critique en bordure de peuplement.....	123
4.3.3) Vitesse critique à l'intérieur du peuplement.....	128
4.3.4) Vitesse critique au-dessus du couvert forestier.....	130
4.4) Discussion.....	131
4.4.1) Considérations sur la méthodologie.....	131
4.4.2) Caractéristiques de la cime .....	133
4.2.2.1) Volume de la cime .....	133
4.2.2.2) Poids de la cime .....	133
4.2.2.3) Longueur de la cime .....	134
4.2.2.4) Diamètre de la cime .....	134
4.4.3) Vitesse critique en bordure du peuplement.....	135
4.4.4) Vitesse critique à l'intérieur du peuplement.....	136
Discussion générale.....	138
Conclusion.....	140
Bibliographie.....	141

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Différents types de dommages causés par le vent en milieu forestier (Adapté de Mayer, 1987) .....	4
Figure 2: Forces au niveau de l'arbre (Adapté de Bouchon, 1987).....	15
Figure 3: Volume total par groupe d'essences retrouvé au Québec .....	18
Figure 4: Localisation de la Forêt Montmorency.....	32
Figure 5: Principaux points du système de treuillage .....	37
Figure 6: Principaux paramètres de base du modèle.....	39
Figure 7: Diagramme de corps libre lorsque le moment maximal est atteint .....	40
Figure 8: Calcul de $\theta$ et des coordonnées du point $D$ à partir de la dénivellation ( $\alpha$ ) et de la distance ( $L$ ) entre l'arbre et le treuil .....	42
Figure 9: Schéma illustrant le mécanisme d'application de la force.....	43
Figure 10: Treuil utilisé lors des essais de treuillage .....	44
Figure 11: Structure de la cellule de charge ( <i>S-Beam 6000I</i> ).....	45
Figure 12: Système d'attache entre la cellule de charge et le treuil .....	45
Figure 13: <i>Data logger L840™</i> avec carte d'acquisition et cellule de charge .....	46
Figure 14: Vue en plongée d'un site de treuillage .....	47
Figure 15: Système de pesée illustrant la pesée d'une bille .....	50
Figure 16: Graphique de la force enregistrée en fonction du temps écoulé.....	52
Figure 17: Position de l'étalon et des points servant au redressement de l'image .....	54
Figure 18: Image T avec l'étalon repositionné .....	56
Figure 19: Localisation des points et mesures des distances sur les images A et T .....	57
Figure 20: Calcul de la position du point C .....	59
Figure 21: Comportement des tiges rompues (×) et des tiges renversées (◆) pour l'épinette blanche .....	65
Figure 22: Faible relation linéaire entre le moment critique et le volume racinaire chez l'épinette blanche.....	67
Figure 23: Moment critique en fonction du poids total pour l'épinette blanche .....	69
Figure 24: Logarithme naturel du moment critique en fonction du logarithme naturel du <i>DHS</i> pour l'épinette blanche .....	70

Figure 25: Moment critique en fonction du poids total pour l'épinette blanche .....	70
Figure 26: Logarithme naturel du moment critique en fonction du logarithme naturel de $H \cdot DHP^2$ pour l'épinette blanche .....	71
Figure 27: Comportement des tiges rompues (×) et des tiges renversées (◆) pour le sapin baumier.....	75
Figure 28: Faible relation linéaire entre le moment critique et le volume racinaire chez le sapin baumier.....	77
Figure 29: Relation linéaire entre le logarithme naturel du moment critique et le logarithme naturel de $H \cdot DHP^2$ pour le sapin baumier.....	79
Figure 30: Relation linéaire entre le moment critique et le poids de la tige pour le sapin baumier.....	79
Figure 31: Relation linéaire entre le moment critique et le poids total pour le sapin baumier .	80
Figure 32: Relation linéaire entre le logarithme naturel du moment critique et le logarithme naturel du $DHP$ pour le sapin baumier.....	80
Figure 33: Comparaison des équations linéaires entre le moment critique et l'âge réel .....	82
Figure 34: Comparaison des équations linéaires entre le moment critique et la hauteur totale	82
Figure 35: Comparaison des équations linéaires entre le moment critique et le poids total .....	83
Figure 36: Comparaison des équations linéaires entre le moment critique et le poids de la tige .....	83
Figure 37: Comparaison des équations linéaires entre le logarithme naturel du moment critique et le logarithme naturel du $DHP$ .....	84
Figure 38: Comparaison des équations linéaires entre le logarithme naturel du moment critique et le logarithme naturel du $DHS$ .....	84
Figure 39: Comparaison des équations linéaires entre le logarithme naturel du moment critique et le logarithme naturel de $H \cdot DHP^2$ .....	85
Figure 40: Comparaison des équations linéaires entre le logarithme naturel du moment critique et le logarithme naturel de $H/D$ .....	85
Figure 41: Comparaison des équations linéaires entre le moment critique et le volume du système racinaire.....	86
Figure 42: Cadrage de l'arbre lors des essais de treuillage (A) et cadrage de l'arbre permettant le respect de l'hypothèse no 1 (B) .....	90

Figure 43: Comparaison des équations de la hauteur totale en fonction du <i>DHP</i> chez le sapin baumier et l'épinette blanche.....	99
Figure 44: Position des arbres dans le couvert forestier (D: dominant, C: codominant, I : intermédiaire, O: opprimé).....	104
Figure 45: Transformation de la cime conique en tronc de paraboloïdes, puis en cylindres perméables et finalement en cylindres imperméables (Adapté de Smith et al (1987))..	110
Figure 46. Vitesses de vent ( $U_{c(i)}$ ) et hauteurs des centres de gravité ( $H_i$ ) des cylindres de diamètre $D_{e(i)}$ et de longueur $L_i$ représentant les différentes sections de l'arbre. Tiré de Smith (1987).....	113
Figure 47: Comparaison des droites de régression du poids de la cime en fonction du <i>DHP</i> pour l'épinette blanche et le sapin baumier .....	120
Figure 48: Comparaison des droites de régression du poids de la cime en fonction du <i>H/D</i> pour l'épinette blanche et le sapin baumier .....	121
Figure 49: Comparaison des droites de régression de la longueur de la cime en fonction du <i>H/D</i> pour l'épinette blanche et le sapin baumier .....	122
Figure 50: Comportement des tiges rompues (×), des tiges renversées (◆) et valeur du coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ) pour l'épinette blanche.....	125
Figure 51: Comportement des tiges rompues (×), des tiges renversées (◆) et valeur du coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ) pour le sapin baumier .....	126
Figure 52: Comparaison des relations linéaires impliquant la vitesse critique ( $U_{cMax}$ ) pour l'épinette blanche et le sapin baumier .....	128
Figure 53: Comportement des tiges rompues (×), des tiges renversées (◆) et valeur du coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ) pour l'épinette blanche.....	129



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Principales caractéristiques dendrométriques des arbres treuillés sur les quatre sites de treuillage.....	34
Tableau 2: Principales caractéristiques pédologiques des sites de treuillage .....	35
Tableau 3: Indice de qualité de station de Pothier et Savard (1998) et du Ministère des Ressources naturelles (Anonyme 1992) pour le sapin baumier .....	35
Tableau 4: Caractéristiques dendrométriques moyennes des tiges d'épinette blanche treuillées .....	62
Tableau 5: Caractéristiques moyennes des systèmes racinaires des tiges d'épinette blanche treuillées et résultats des test de $t$ .....	62
Tableau 6: Hauteur moyenne du centre de gravité et du point d'attache des épinettes blanches treuillées .....	63
Tableau 7: Statistiques des différentes variables pour l'épinette blanche .....	64
Tableau 8: Analyse de corrélation entre les différentes variables liées à la taille de l'arbre chez l'épinette blanche ( $n = 43$ et $n = 38$ pour $V_{rac}$ ).....	66
Tableau 9: Transformation des variables pour contrer l'hétérogénéité de la variance des erreurs expérimentales pour l'épinette blanche et le sapin baumier .....	67
Tableau 10: Caractéristiques des régressions impliquant le moment critique ( $M_c$ ) et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche .....	68
Tableau 11: Caractéristiques dendrométriques moyennes des tiges de sapin baumier treuillées .....	72
Tableau 12: Caractéristiques moyennes des systèmes racinaires des tiges de sapin baumier treuillées et résultats des tests de $t$ .....	72
Tableau 13: Hauteur moyenne du centre de gravité et du point d'attache des sapins baumiers treuillés .....	73
Tableau 14: Statistiques des différentes variables pour le sapin baumier.....	74
Tableau 15: Analyse de corrélation entre les différentes variables liées à la taille de l'arbre chez le sapin baumier ( $n = 41$ et $n = 38$ pour $V_{rac}$ ).....	76
Tableau 16: Caractéristiques des régressions impliquant le moment critique ( $M_c$ ) et les différentes variables indépendantes pour le sapin baumier.....	78

Tableau 17: Résultats du test de Chow .....	81
Tableau 18: Caractéristiques moyennes des cimes des tiges d'épinette blanches treuillées ...	117
Tableau 19: Caractéristiques moyennes des cimes des tiges de sapin baumier treuillées .....	118
Tableau 20: Caractéristiques des régressions impliquant le volume de la cime et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche et le sapin baumier .....	118
Tableau 21: Caractéristiques des régressions impliquant le poids de la cime et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche et le sapin baumier .....	119
Tableau 22: Caractéristiques des régressions impliquant la longueur de la cime et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche et le sapin baumier.....	121
Tableau 23: Caractéristiques des régressions impliquant le diamètre de la cime et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche et le sapin baumier.....	123
Tableau 24: Moyenne et écart-type des vitesses maximales ( $U_{cMax}$ ) par site pour l'épinette blanche et le sapin baumier .....	124
Tableau 25: Caractéristiques des régressions impliquant la vitesse maximale ( $U_{cMax}$ ) et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche .....	127
Tableau 26: Caractéristiques des régressions impliquant la vitesse maximale ( $U_{cMax}$ ) et les différentes variables indépendantes pour le sapin baumier.....	127
Tableau 27: Moyenne et écart-type, par site, des vitesses moyennes à l'intérieur du peuplement ( $U_{cMoy}$ ) pour l'épinette blanche et le sapin baumier.....	128
Tableau 28: Caractéristiques des régressions significatives impliquant la vitesse moyenne à l'intérieur du peuplement ( $U_{cMoy}$ ) et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche .....	130

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

### **1.1) PRÉSENTATION DU CHABLIS**

#### **1.1.1) Définition**

Le terme « chablis » désigne un arbre naturellement renversé, déraciné ou rompu par le vent, ou encore brisé sous le poids de la neige ou du givre (Service Canadien des Forêts 1995). Pris dans un sens plus large, le chablis peut également désigner une étendue de terrain où des arbres ont été renversés ou brisés par le vent (Service Canadien des Forêts 1995).

#### **1.1.2) Importance des chablis**

Les dommages engendrés par le vent constituent l'un des types de dégâts les plus importants rencontrés en milieu forestier en Amérique du Nord ainsi qu'ailleurs sur le globe (Savill 1983; Lohmander et Helles 1987; Mitchell 1995b). Les chablis n'engendrent pas seulement des pertes économiques, mais aussi de sérieux problèmes d'aménagement, non seulement en raison de leur impact sur le rendement en fibre, mais aussi de leur effet sur la qualité du paysage et des habitats fauniques (Savill 1983; Stathers et al 1994; Mitchell 1995b; Quine et al 1995).

D'un point de vue économique, la récupération des tiges renversées par le vent s'avère plus onéreuse que la récolte de bois sur pied et de façon générale, leur valeur est moindre en raison de leur bris et de leur détérioration (Savill 1983; Mitchell 1995a; Quine et al 1995). Afin de limiter les pertes dues au chablis, des plans de récupération sont élaborés conjointement par l'état et les industriels. Au Québec, la loi sur les forêts stipule qu'en cas de désastre naturel, tels les incendies, les chablis, les épidémies d'insectes ou les maladies cryptogamiques, le ministre prépare et applique un plan spécial d'aménagement en vue d'assurer la récupération des bois (Anonyme 1999). Mais cette récupération a un coût. Au Québec seulement, durant la période couvrant les années 1993 à 1995, plus de 200 000 m<sup>3</sup> de bois ont été récoltés à la suite de chablis et d'autres causes (en excluant le feu et la tordeuse des bourgeons de l'épinette), ce qui entraîna une diminution des droits de coupes versés au gouvernement de l'ordre de 579 000 \$ (Parent 1996). En comparaison, pour la même période, la diminution des droits de

coupes versés au gouvernement en raison de la récupération des bois provenant d'épidémies de tordeuse des bourgeons de l'épinette et de feux était respectivement de l'ordre de 30 000 \$ et de 104 000 \$ (Parent 1996).

En plus d'avoir une incidence monétaire importante, le chablis a aussi un impact sur le rendement en fibre du territoire. Dans certains cas, des peuplements doivent être récupérés avant qu'ils n'aient atteint l'âge de récolte prévu, alors que dans d'autres cas, les peuplements résiduels auront un plus faible accroissement (Savill 1983; Miller 1985; Quine et al 1995). D'autre part, certains chablis ne peuvent être récupérés en raison de l'inaccessibilité de leur situation géographique, de la non rentabilité des opérations ou d'une incompatibilité de la récolte avec les objectifs d'aménagement d'une ressource autre que le bois (Mitchell 1995a).

Les arbres renversés qui n'ont pas été récupérés peuvent engendrer d'autres problèmes en augmentant la quantité de matière combustible disponible, en entravant le déplacement de la faune et des randonneurs, tout en créant un habitat favorable au développement des scolytes (Mitchell 1995b). De plus, le renversement des bandes riveraines et des corridors fauniques, jumelé à l'impact du chablis sur la qualité du paysage peuvent engendrer des modifications considérables aux plans d'aménagement (Mitchell 1995a).

### **1.1.3) Catégories de chablis**

Il est possible de répartir les différents chablis à l'intérieur de deux grandes catégories, soit les chablis catastrophiques et les chablis endémiques (Savill 1983; Miller 1985). Les chablis catastrophiques sont causés par des tempêtes sévères ayant une longue période de récurrence (Miller 1985). Cette catégorie de dégât représente la plus spectaculaire et la plus désastreuse forme de dommage causé par le vent en milieu forestier (Savill 1983). Les dommages provoqués par ces vents violents peuvent être considérables et ce sans égard à la stabilité du peuplement (Miller 1985). Les chablis catastrophiques dépendent plus de la vitesse et de la direction du vent, ainsi que de la topographie locale, que des caractéristiques du sol ou des pratiques sylvicoles (Miller 1985). Il est d'ailleurs impossible de prédire où les prochains dommages catastrophiques auront lieu (Miller 1985) et de façon générale, aucun traitement

sylvicole ne peut être appliqué de façon à prévenir ces pertes (Mergen 1954; Savill 1983; Miller 1985; De Champs 1987).

Pour leur part, les chablis endémiques sont moins spectaculaires et moins dramatiques que les chablis catastrophiques, mais ils peuvent amener de plus grandes pertes économiques (Savill 1983; Miller 1985). Cette catégorie de dommage se caractérise par le renversement d'arbres seuls ou en petits groupes, lors d'épisodes de vents moins violents, mais dont la fréquence est plus élevée (Savill 1983). Il en résulte alors des petites trouées qui prendront de l'expansion avec le temps. Ce phénomène est particulièrement présent dans les forêts résineuses de la zone boréale (Miller 1985; Ruel 1995). Bien que les dommages attribuables aux chablis endémiques soient sporadiques, ils sont largement influencés par les caractéristiques du site ainsi que par le régime de pratiques sylvicoles (Miller 1985). Par conséquent, il est possible de prédire les risques de dommages associés à ce type de chablis ainsi que de cibler les traitements sylvicoles dont l'application pourrait retarder ou réduire les risques et l'étendue des dommages (Miller 1985).

#### **1.1.4) Types de dommages causés par le vent**

Selon Mayer (1987), il existe quatre différents types de dommages causés par le vent en milieu forestier (Figure 1). Il s'agit du bris de tige, du bris de souche, du bris des racines ainsi que du renversement. En raison de la difficulté à faire la distinction entre ces types de dommages, ces derniers sont la plupart du temps répartis en deux groupes, soit 1) le bris de tige, qui comprend le bris de tige et le bris de souche, ainsi que 2) le renversement, qui comprend le bris de racines et le renversement (Mayer 1987).

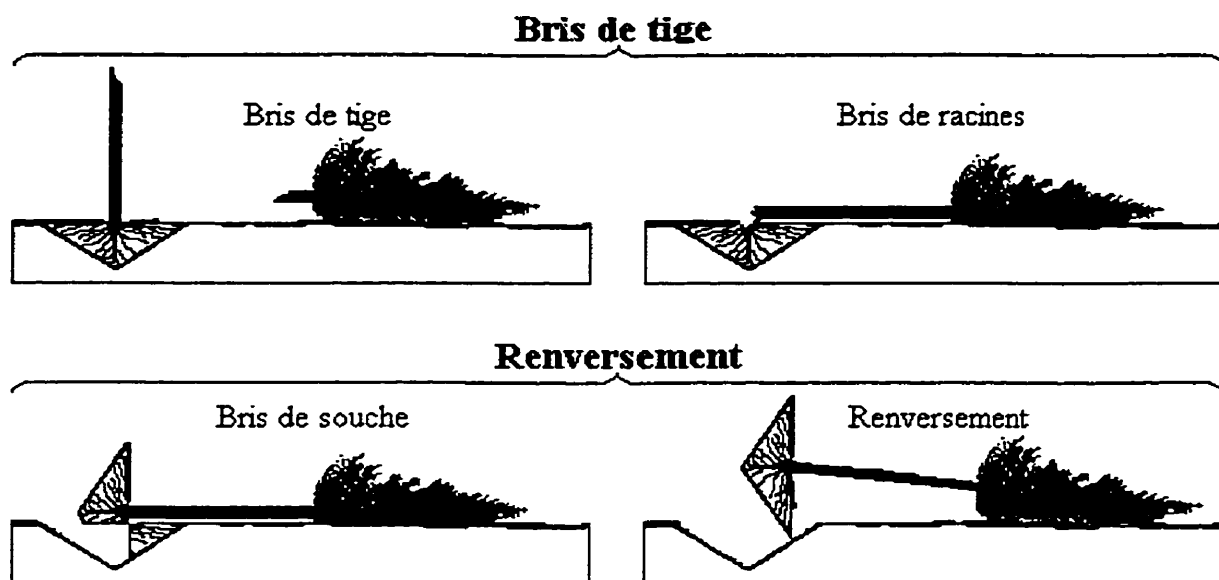


Figure 1: Différents types de dommages causés par le vent en milieu forestier  
(Adapté de Mayer, 1987)

## 1.2) RÉSISTANCE DES TIGES

### 1.2.1) Résistance mécanique

De façon générale, différents tests ou calculs sont requis afin de déterminer la résistance d'une structure. Selon Metzger (1893), tel que décrit dans Assmann (1970), un arbre doit être considéré comme une poutre encastrée dont la résistance à la flexion imposée par le vent est uniforme. Bien que l'on puisse théoriquement associer un arbre à une poutre encastrée et calculer le moment de force à la base cette poutre, il demeure que l'information et les connaissances concernant la résistance mécanique du sapin baumier et de l'épinette blanche proviennent surtout d'expériences réalisées en laboratoire sur des pièces de bois d'œuvre et non sur des tiges vivantes. Lors de ces tests, de petits échantillons de bois sain (sans défaut) sont utilisés afin de déterminer les propriétés mécaniques des différents types de bois (Silvester 1967; Jessome 1977). Il en ressort que le module de rupture pour le sapin baumier est de 36,5 (10,6)<sup>1</sup> MPa alors qu'il est légèrement plus faible pour l'épinette blanche, soit de 35,2 (12,5) MPa (Jessome 1977). Par ailleurs, le module d'élasticité est de 7790 (14,3) MPa pour le sapin

<sup>1</sup> Coefficient de variation

baumier, alors qu'il est plus élevé pour l'épinette blanche, soit de 7930 (18,6) MPa (Jessome 1977).

En pratique, ces données ne peuvent être appliquées directement au bois de construction, car il s'agit de valeurs maximales pour des échantillons de bois sain (Jessome 1977). Ces valeurs ne peuvent encore moins être appliquées à l'échelle d'une tige vivante, en raison des différences dans les caractéristiques du bois que l'arbre produit d'année en année et des défauts inhérents à la tige (Silvester 1967). Il ne serait donc pas justifié d'utiliser directement l'hypothèse de Metzger pour comparer des arbres sur pied, sans apporter d'ajustement tenant compte des défauts.

### **1.2.2) Comparaison de deux espèces établies sur un même site**

Depuis longtemps, les forestiers cherchent à minimiser l'impact des chablis sur les peuplements forestiers (Ruth et Yoder 1953; Mergen 1954; Busby 1965; Neustein 1971; Lohmander et Helles 1987; Harris 1989). Certains ont alors observé que les différentes espèces ligneuses, tant résineuses que feuillues, ne présentaient pas la même résistance au renversement (Fritzsche, 1933 dans (Mergen 1954))(Fraser 1964; Savill 1983). L'information disponible sur ce sujet concerne principalement les essences européennes (Bouchon 1987; Lohmander et Helles 1987; Mitchell 1995b; Ruel 1995), et au Canada, bien que le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) soit considéré comme plus vulnérable au chablis que l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss), cette affirmation s'appuie principalement sur une plus grande vulnérabilité du sapin baumier à la carie (Whitney 1976; Whitney 1989; Basham 1991) et non sur les résultats d'études de treuillage.

Parmi les essais réalisés par le passé, Ruth et Yoder (1953) ont comparé les arbres renversés et ceux qui ont résisté au vent lors d'un chablis survenu en bordure d'une coupe d'un peuplement de pruches, d'épinettes et de sapin Douglas, afin de déterminer l'essence la plus résistante qui pourrait être utilisée pour constituer une bordure stable. D'autres ont étudié l'épinette de Sitka et le sapin Douglas pour déterminer s'il était possible d'évaluer le risque de chablis en mesurant la résistance d'arbres échantillons au treuillage, sans toutefois les comparer, car ces deux essences se trouvaient sur des sites différents (Fraser 1962a). Selon

Fraser (1962a), d'autres expériences impliquant des essences différentes sur un même type de sol étaient nécessaires afin d'améliorer les connaissances concernant la résistance au chablis.

### **1.2.3) Résistance du sapin baumier et de l'épinette blanche**

À la lumière des informations précédentes, il est possible de constater la nécessité d'obtenir une comparaison de la résistance du sapin baumier et de l'épinette blanche qui soit la plus fiable possible, il était donc nécessaire de réaliser le treuillage sur des tiges s'étant développées dans des conditions similaires. C'est pourquoi, des échantillons de chaque essence ont été treuillés sur chaque site.

La présente étude vise donc premièrement, à déterminer et à comparer la résistance au renversement du sapin baumier et de l'épinette blanche, à la suite d'une synthèse des connaissances concernant le chablis, et deuxièmement, à comparer les caractéristiques des cimes des arbres treuillés pour ensuite déterminer les différentes vitesses de vent nécessaires au renversement des tiges de sapin baumier et d'épinette blanche.

Le second chapitre est donc consacré à la présentation des facteurs influençant les risques de chablis, à la description des forces engendrées par le vent, à la description des essences à l'étude et à une revue des études déjà publiées sur le treuillage. Par la suite, le troisième chapitre présente la méthodologie utilisée lors du treuillage, les résultats des analyses statistiques et une discussion de ces résultats. Finalement, le quatrième chapitre est consacré à l'analyse des caractéristiques des cimes des arbres treuillés, de même qu'à l'étude de la vitesse critique nécessaire au renversement en bordure et à l'intérieur du peuplement. Il contient une description détaillée de la méthodologie utilisée ainsi qu'une analyse et une discussion des résultats obtenus.



## REVUE DE LA LITTÉRATURE

### 2.1) FACTEURS INFLUENÇANT LES RISQUES DE CHABLIS

Les chablis sont le résultat d'interactions complexes entre de nombreux facteurs qui peuvent être répartis en quatre grandes catégories qui sont: le climat, la topographie, le sol et le peuplement (Miller 1985; Mitchell 1995b; Ruel 1995).

#### 2.1.1) Le climat

Bien que la quantité de chablis soit sans contredit liée à la vitesse du vent, il est difficile d'établir une vitesse moyenne maximale au-dessus de laquelle celui-ci risque d'avoir lieu (Bouchon 1987; Ruel 1995). Certains auteurs établissent cette vitesse critique aux environs de 100 km/h (Bouchon 1987). La force du vent est donc l'un des premiers facteurs à observer lors de l'évaluation des risques de renversement (Schaetzl et al 1989; Mitchell 1995b). Cependant, lors d'un épisode venteux, la vitesse moyenne n'est pas toujours un bon indicateur de la force du vent, puisque celle-ci varie, passant de l'accalmie à la rafale (Savill 1983). Lors de ces rafales, la vitesse du vent peut être de 40% à 50% plus élevée que la vitesse moyenne enregistrée pour l'heure (Busby 1965; Smith et al 1987), et alors, la force induite par les plus puissantes rafales peut atteindre jusqu'à dix fois celle du vent moyen (Quine et al 1995). Ce sont donc les rafales qui constituent la principale cause de dommages en forêt (Quine et al 1995).

Les rafales sont en relation avec la turbulence qui est générée par l'interaction entre le vent, la topographie et le couvert forestier (Ruel 1995). La turbulence se produit lorsque les particules d'air se déplacent dans des directions continuellement changeantes et à des vitesses variables plutôt que de se déplacer à vitesse constante en suivant des lignes droites (Buck 1964). La turbulence est de nature irrégulière et augmente en fonction de la vitesse du vent et de la rugosité de la surface au-dessus de laquelle l'air circule (Buck 1964; Savill 1983; Quine et al 1995). Par exemple, un changement dans la nature de la végétation ou une variation subite de sa hauteur provoque une augmentation de la turbulence, de même que des changements dans la vitesse du vent (Quine et al 1995). Le caractère irrégulier de la turbulence peut-être illustré

par l'orientation aléatoire des tiges renversées souvent observée et qui ne correspond pas à la direction du vent lors de la tempête (Savill 1983; Ruel 1995).

L'orientation du vent peut aussi influencer le niveau de dommages engendrés lors d'un chablis (Ruel 1995). Peu importe le lieu, il y a généralement présence d'un vent dominant auquel les arbres réagissent, en développant une résistance accrue au renversement dans la direction où souffle le vent dominant (Busby 1965; Robertson 1987). Lorsque le vent souffle dans une autre direction, les arbres sont moins bien adaptés en raison du manque d'exposition à de tels vents (Busby 1965). C'est pourquoi des vents de tempête moins fréquents provenant d'une direction autre que celle généralement supportée par les tiges peuvent causer plus de dommages qu'un vent dominant de même intensité ou même plus élevée (Moore 1977; Robertson 1987).

Un autre facteur à considérer lors des tempêtes est l'oscillation continue des tiges qui cisaille le sol et affaiblit progressivement les racines (Gardiner 1997). De plus, les mouvements peuvent provoquer de l'abrasion, si les racines se retrouvent à proximité de roches (Stathers et al 1994; Gardiner 1997). De longues tempêtes de plus faible intensité ou de plus fréquentes tempêtes de faible intensité peuvent causer des chablis, en affaiblissant le complexe racine/sol, tout spécialement si le sol est mouillé (Stathers et al 1994).

### **2.1.2) La topographie**

Au niveau local, ce sont les caractéristiques topographiques qui déterminent l'exposition relative au vent (Hütte 1968; Quine et al 1995; Ruel 1995). Il est possible de comparer le comportement du vent à l'écoulement de l'eau; il accélère lorsqu'il emprunte un passage étroit et devient turbulent à sa sortie ou lorsqu'il passe au-dessus d'un obstacle (Moore 1977; Quine et al 1995). De la même façon, la turbulence ainsi que la force du vent augmentent lors du passage de la crête d'une montagne (Quine et al 1995; Ruel 1995). Le comportement de l'air est alors influencé par la forme de la crête et par la vitesse et la direction du vent (Ruel 1995).

L'influence de la topographie sur l'exposition au vent d'un site est un phénomène complexe lié à la forme du relief (Miller 1985; Ruel 1995). Ainsi, la force et la direction du vent peuvent

être modifiées de façon significative lorsque la topographie du terrain est complexe, car le vent accélère le long de la pente et atteint son maximum au-dessus des sommets (Miller 1985; Quine et al 1995). Il en est de même dans les vallées, où le vent se retrouve canalisé (Miller 1985; Quine et al 1995).

### 2.1.3) Le sol

Le sol constitue le médium d'ancrage de l'arbre, il est donc d'une importance vitale pour sa stabilité (Busby 1965; Hintikka 1972; Quine et al 1995). La capacité d'un arbre à résister au renversement dépend des caractéristiques de son système racinaire, des propriétés du sol ainsi que de la force du lien unissant les racines aux particules de sol (Cremer et al 1982; Peltola et Kellomäki 1993).

Il est reconnu depuis longtemps que les différents types de sol possèdent des caractéristiques qui limitent le développement du système racinaire, ce qui affecte par le fait même la susceptibilité de l'arbre au chablis (Mergen 1954; Quine et al 1995; Ruel 1995). De façon générale, ce sont les conditions rencontrées dans le sol qui limitent l'expansion du système racinaire et non la nature même du dépôt (Fraser 1962a; Quine et al 1995). Les principales causes qui limitent la croissance du système racinaire sont un apport inadéquat en oxygène, la résistance du sol à la pénétration des racines ainsi que la capacité de rétention d'eau du sol (Mergen 1954; Miller 1985; Quine et al 1995). Comme peu d'arbres ont des racines aptes à se développer dans l'eau, il n'est pas étonnant que la profondeur de l'enracinement soit étroitement corrélée à la profondeur de la nappe phréatique (Lieffers et Rothwell 1987; Duncan et Nicoll 1998).

La résistance au cisaillement d'un sol est un facteur important qui influence la résistance au renversement (Miller 1985). Pour assurer une stabilité maximale à l'arbre, le sol doit pouvoir résister aux forces de cisaillement, de tension et de compression qui lui sont induites par les racines, lorsque le vent fait osciller l'arbre (Quine et al 1995). La résistance d'un sol aux différentes forces qu'il subit varie en fonction de sa texture, de son contenu en matière organique, et en matériel colloïdal et tout spécialement de sa teneur en eau (Mergen 1954; Miller 1985).

## **2.1.4) Le peuplement**

### **2.1.4.1) Densité et structure du peuplement**

La densité des peuplements joue un rôle important au niveau des forces appliquées sur les arbres, de même que sur la dissipation de l'énergie transmise par le vent (Ruel 1995). Lorsque la densité est forte et que le couvert est uniforme, la résistance au vent des individus a de bonnes chances d'être faible (Busby 1965; Mitchell 1995b). Les arbres sont alors dépendants de leurs voisins en ce qui concerne l'abri et le support mutuel (Busby 1965; Mitchell 1995b). Le contact entre les cimes constitue une composante importante de la dissipation de l'énergie emmagasinée par les arbres (Somerville 1980; Mitchell 1995b; Wood 1995). C'est donc l'ensemble du peuplement qui assure la stabilité des arbres (Busby 1965; Wood 1995). Si cet environnement change en raison d'un prélèvement de matière ligneuse, d'épidémie d'insectes ou du développement de champignons, cette stabilité peut être compromise (Busby 1965; Wood 1995).

La densité initiale du peuplement peut, elle aussi, jouer un rôle significatif sur la susceptibilité d'un peuplement au chablis en affectant les caractéristiques du système racinaire des arbres, la forme des tiges, ainsi que la vitesse du vent au-dessus et à l'intérieur du couvert (Somerville 1980). En effet, il a été observé que les peuplements plus ouverts renferment des arbres dont le système racinaire est plus développé, ce qui leur procure un meilleur ancrage et leur permet d'absorber plus d'énergie (Somerville 1980; Cremer et al 1982). La raison principale de la meilleure conformation des racines est liée à la réaction de l'arbre à une plus grande exposition au vent (Mergen 1954; Cremer et al 1982). Ces arbres possèdent des cimes plus volumineuses, ce qui augmente l'emprise du vent sur celles-ci (Somerville 1980). Il en résulte une plus grande sollicitation du système racinaire et de la tige, qui entraîne une augmentation de la résistance de l'ancrage de la tige ainsi qu'un plus grand défilement, ce qui permet d'absorber plus d'énergie et de limiter la flexion de la tige dans le vent (Busby 1965; Somerville 1980; Cremer et al 1982). Une des raisons pouvant expliquer ce plus grand défilement se résume dans le fait que dans les peuplements moins denses, la croissance en diamètre est favorisée sans que la croissance en hauteur soit modifiée (Ruel 1995).

#### 2.1.4.2) Espèce

Les différentes espèces ligneuses ne possèdent pas toutes la même résistance au chablis. Dans la littérature, la plus grande partie de l'information quantitative disponible sur ce sujet concerne les essences européennes (Busby 1965; Savill 1983; Bouchon 1987; Lohmander et Helles 1987; Mitchell 1995b; Ruel 1995) et portent sur les conifères, ces derniers étant plus susceptibles au chablis que les feuillus (Savill 1983). Au Canada, le sapin baumier est considéré comme plus vulnérable au chablis que l'épinette blanche ou l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.), et ce, surtout en raison de sa grande vulnérabilité à la carie (Whitney 1976; Whitney 1989; Basham 1991). La composition en essences d'un peuplement est donc un facteur important à considérer lorsque vient le temps d'évaluer la susceptibilité au chablis dans les peuplements résineux de l'est du Canada (Ruel 1995).

#### 2.1.4.3) Hauteur et âge

Il existe principalement trois facteurs responsables de l'augmentation des chablis en relation avec l'augmentation de la hauteur des arbres (Cremer et al 1982). Premièrement, plus la hauteur d'un arbre est élevée, plus le moment de force appliqué à la base de l'arbre augmente, ce qui constitue un facteur critique en ce qui concerne le renversement (Cremer et al 1982; Savill 1983; Harris 1989; Schaetzl et al 1989). Le moment d'une force  $F$  par rapport à un point  $Z$  se définit comme étant le produit de cette force par la distance entre la ligne d'action de cette force et le point  $Z$ . Deuxièmement, comme la vitesse du vent augmente en fonction de la hauteur au-dessus du sol ou au-dessus du peuplement, les arbres qui sont plus grands que leurs voisins sont soumis à une force plus grande (Busby 1965; Cremer et al 1982). Troisièmement, et de façon plus importante, les arbres qui se développent dans des peuplements denses n'ont pas une croissance radiale proportionnelle à leur croissance rapide en hauteur, et c'est ce faible défilement qui les rend plus vulnérables au chablis (Cremer et al 1982; Savill 1983).

En ce qui concerne la relation qui existe entre l'âge d'un peuplement et la quantité de dommages par chablis, elle peut d'une part s'expliquer par une augmentation de la hauteur avec l'âge (Ruel 1995). D'autre part, la hausse du nombre de chablis peut aussi être associée à une augmentation de la quantité de carie avec l'âge (Whitney 1989; Basham 1991; Ruel 1995). Les caries de tige ou de racines provoquent des types de chablis différents; ainsi les caries de

tige font augmenter le risque de bris de tige, alors que le risque de renversement est augmenté par les caries de racine (Fraser 1962a; Busby 1965; Smith et al 1987; Harris 1989; Schaetzl et al 1989).

#### 2.1.4.4) Forme de la tige

La forme de la tige a souvent été associée à la résistance au renversement ou au bris de tige (Cremer et al 1982; Savill 1983; De Champis 1987; Lohmander et Helles 1987; Harris 1989). De même, Petty et Swain (1985), Savill (1983) et Petty et Worrel (1981) affirment que le facteur le plus important agissant sur la susceptibilité d'un arbre au bris par le vent est le défilement. Ainsi, il a été identifié que le ratio hauteur sur diamètre, calculé sur les 200 plus gros arbres à l'hectare, constitue un indice valable pour évaluer le risque de bris de tige (Cremer et al 1982). Aussi, les tiges qui ont un faible défilement (un rapport hauteur / diamètre élevé) ont plus de chances d'être renversées ou brisées que celles qui ont un fort défilement (un rapport hauteur / diamètre faible) (Peltola et Kellomäki 1993). En effet, la contrainte en tension est minimale et distribuée de façon plus uniforme lorsque le défilement de la tige est de l'ordre de -0,60 (0,00 représentant une tige de défilement nul et -1,00 un défilement maximum) (Leiser et Kemper 1973; Niklas 1992).

#### 2.1.4.5) Racines

La résistance au renversement d'un arbre dépend de la relation entre le moment critique et l'enracinement de l'arbre, ce dernier étant fonction du poids des racines, mais aussi de la profondeur et du diamètre du complexe sol-racine ainsi que des propriétés du sol (Peltola et Kellomäki 1993). Par conséquent, plus la masse de sol adhérent au système racinaire d'un arbre est élevée, plus l'arbre est résistant au vent (Quine et al 1995). Les racines ramifiées et plongeantes, parfois qualifiées de racines en forme de cœur, retiennent une quantité importante de sol et sont une composante importante de l'ancrage de l'arbre (Mergen 1954; Busby 1965; Strong et La Roi 1983). Le développement des racines et de la masse de sol qui y adhère est influencé par la densité relative du peuplement, par la grosseur de l'arbre ainsi que par les conditions de croissance au-dessus et dans le sol (Cremer et al 1982). Un autre facteur influençant la masse de sol retenue par les racines est lié à la présence de carie de racines qui

affecte la résistance mécanique du système racinaire et diminue également la masse de sol qui y adhère, en détruisant une partie du système racinaire (Busby 1965).

## **2.2) DESCRIPTION DES FORCES ENGENDRÉES PAR LE VENT**

Lorsqu'un arbre est soumis à l'action du vent, sa cime oscille selon un patron elliptique, dont l'axe le plus grand est orienté dans la direction où souffle le vent (Mergen 1954; Stathers et al 1994). Chaque côté de la tige et du système racinaire est alors soumis de façon successive à des forces de tension, de compression et de cisaillement (Mergen 1954; Stathers et al 1994). Ces forces atteignent leur maximum lorsque la tige penche du côté sous le vent, alors qu'elles sont moindres lorsqu'elle revient du côté exposé au vent, car à ce moment, les forces ne sont provoquées que par le retour du mouvement de balancier de la tige (Mergen 1954).

Afin de résister aux forces qui lui sont appliquées, l'arbre doit s'adapter de façon à ce qu'à tout moment, l'équilibre des forces soit respecté.

### **2.2.1) Équilibre des forces**

La force du vent entraîne une série de réactions au niveau de l'arbre. Pour examiner toutes les interactions entre les différentes forces présentes, il faut considérer tout le système au-dessus et au-dessous du sol (Ruel 1995).

Les forces influençant le renversement ou le bris d'un arbre sont les suivantes (Bouchon 1987; Mitchell 1995b; Peltola et al 1997) (Figure: 3):

- la force due au vent, qui résulte de l'emprise du vent dans la cime;
- le poids de la partie aérienne, qui résulte de la force gravitationnelle appliquée au centre de gravité de l'arbre.

Par ailleurs, les forces s'opposant au renversement se décomposent de la manière suivante (Coutts 1983; Bouchon 1987) (Figure: 2):

- la résistance du sol à la fracture, qui est fonction de l'élasticité du sol;
- le poids de la motte composée de racines et de terre, qui résulte de la force

gravitationnelle appliquée à la motte de racines et de terre;

- la résistance à la tension et à l'arrachement des racines, qui est fonction de la résistance en tension du bois et de cohésion entre les racines et le sol;
- la résistance à la flexion des racines et du sol, qui est liée à la résistance en flexion et en compression des racines et de la résistance à la compression du sol.

Tant que les forces induites par le vent et la gravité ne dépassent pas les forces de résistance de l'arbre, ce dernier restera stable, mais lorsque les forces appliquées à l'arbre deviennent plus fortes que sa résistance, l'arbre se brise ou se renverse (Telewski 1995; Gardiner 1997). La distinction entre le bris et le renversement réside dans le fait que lorsque la résistance au renversement est plus forte que la résistance de la tige, il y aura bris de tige (Mergen 1954; Gardiner 1997). De même, il y aura renversement si la résistance de la tige est plus forte que la résistance au renversement (Mergen 1954; Ruel 1995).



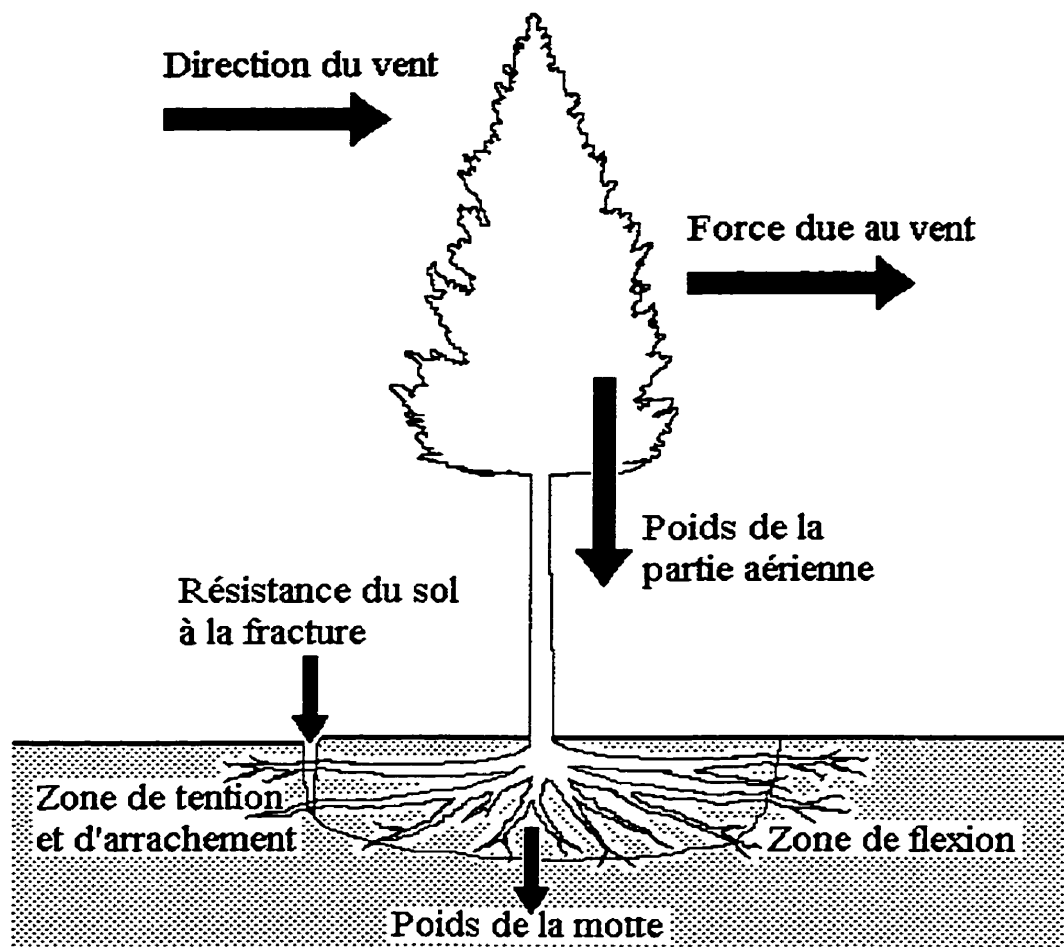


Figure 2: Forces au niveau de l'arbre (Adapté de Bouchon, 1987)

## 2.2.2) Forces entraînant le bris ou le renversement

### 2.2.2.1) Force due au vent

La force qui est transmise à l'arbre par le vent est le résultat de la résistance qu'opposent le feuillage, les branches et le tronc à l'écoulement de l'air (Niklas 1992). Plus la vitesse du vent augmente, plus le tronc, les branches et les aiguilles se courbent de façon à devenir plus aérodynamiques (Stathers et al 1994; Gardiner 1997). La surface frontale de l'arbre diminue alors, tout comme son coefficient de résistance dans le vent (Stathers et al 1994; Gardiner 1997). À ce moment, une moins grande quantité d'énergie est transférée à l'arbre par le vent, diminuant ainsi le moment de force produit à la base de l'arbre.

### 2.2.2.2) Poids de la partie aérienne

Il a été présenté précédemment que lorsqu'un arbre est soumis à l'action du vent, sa cime oscille selon un patron elliptique (Mergen 1954; Stathers et al 1994). La cime, ainsi déplacée par la force du vent, mais aussi par la force associée à la gravité, tend à augmenter le déplacement et à renverser l'arbre. En comparaison avec la force induite par le vent, la force gravitationnelle est relativement faible jusqu'à ce que la tige se soit déplacée à un bon angle par rapport à l'axe vertical (Stathers et al 1994). Selon Stathers et al (1994), la force gravitationnelle peut devenir une composante considérable de la force horizontale totale lorsque l'angle d'oscillation atteint 15 à 20°. En effet, lorsque la force du vent et de la gravité déplacent un arbre jusqu'à ce qu'il se renverse, le moment de force attribuable à la gravité peut atteindre 30% du moment de force total nécessaire au renversement (Quine et al 1995). Le moment induit par la force gravitationnelle est donc loin d'être négligeable et se doit d'être considéré dans les calculs servant à déterminer la résistance de l'arbre (Petty et Swain 1985; Mayer 1987; Stathers et al 1994; Quine et al 1995; Silva et al 1998).

### 2.2.3) Forces s'opposant au bris ou au renversement

#### 2.2.3.1) Résistance du sol à la fracture et poids de la motte

Tant que les mouvements de l'arbre sont faibles, c'est la résistance du sol qui constitue la composante majeure s'opposant au renversement (Coutts 1983; Bouchon 1987). Mais lorsque l'arbre est sollicité par le vent, le sol cède en tension, en raison de sa faible élasticité, peu après le début du déplacement du système (Coutts 1983). Même si le sol se cisaille à la limite de la motte, le poids du système racinaire et du sol qui y est retenu, ainsi que la force de friction entre les deux plans de cisaillement vont continuer à agir tout au long du processus de renversement (Coutts 1983).

#### 2.2.3.2) Résistance à la tension et à l'arrachement des racines

Lorsque les mouvements de l'arbre augmentent, c'est la résistance des racines qui devient la plus importante (Bouchon 1987; Ruel 1995). Les racines et le sol du côté exposé au vent sont soumis à des forces de tension et de cisaillement, sans qu'il y ait de surface pour contrer leur mouvement vers le haut (Mergen 1954; Coutts 1983). Les racines entrent donc rapidement en tension. L'absence de support au dessus des racines implique que leur flexion aura lieu à une

plus grande distance de la tige, où le diamètre des racines est plus faible (Mergen 1954; Coutts 1983).

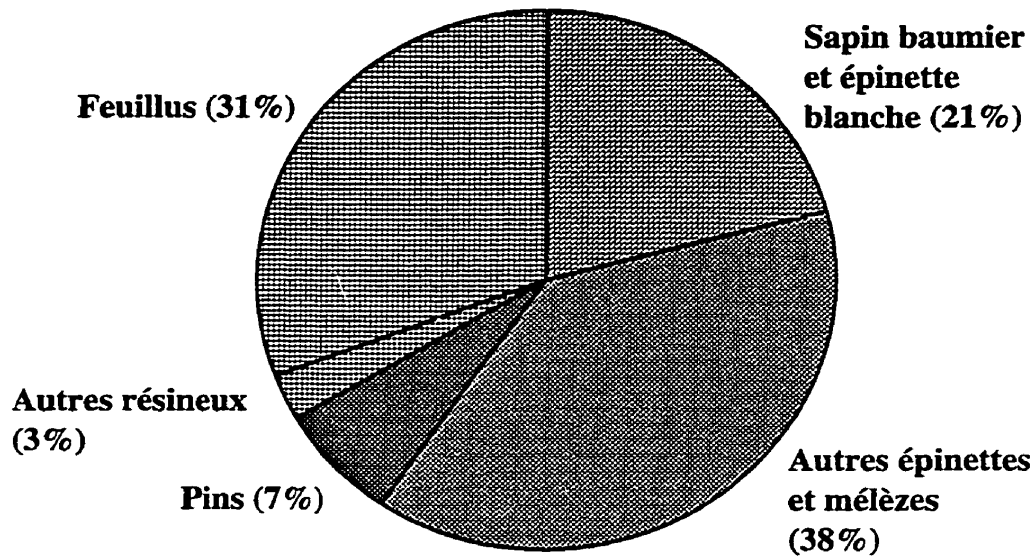
### 2.2.3.3) Résistance à la flexion des racines et du sol

Les racines et le sol du côté sous le vent (à l'abri du vent) sont soumis à des forces de flexion et de compression contre la surface du sol qui se situe au-dessous (Mergen 1954; Coutts 1983). Cette flexion et cette compression auront lieu près de la base de l'arbre, du côté sous le vent. Comme le bois vert est plus résistant en tension qu'en compression, les racines du côté sous le vent jouent un rôle critique en ce qui concerne la résistance au renversement (Mergen 1954). La division des racines du côté sous le vent peut causer une réduction substantielle de la rigidité du système d'ancrage de la tige, car si on compare la rigidité des racines à celle d'une poutre cylindrique, sa résistance est alors liée à la quatrième puissance du diamètre (Coutts 1983). Par exemple, si la poutre ou la racine se sépare en deux branches totalisant une même section circulaire, la rigidité de la poutre est diminuée de moitié (Coutts 1983). Il en ressort donc qu'un système racinaire composé de quelques grosses racines latérales sera plus rigide qu'un système racinaire composé de plusieurs racines plus fines (Coutts 1983; Stathers et al 1994).

## 2.3) DESCRIPTION DES ESPÈCES ÉTUDIÉES

Le sapin baumier et l'épinette blanche sont deux espèces présentes à la grandeur de la province du Québec. Bien qu'elles se rencontrent dans toutes les zones de végétation, elles se retrouvent principalement en forêt boréale et en forêt mixte, soit dans les domaines bioclimatiques de la sapinière à bouleau blanc et de la sapinière à épinette blanche, ainsi que dans ceux de la sapinière à bouleau jaune et de la bétulaie jaune à sapin (Thibault 1985).

Au Québec, les données statistiques concernant la ressource forestière (Parent 1996) révèlent que 21 % du volume marchand total de la forêt est composé de sapin baumier et d'épinette blanche. Ceci fait de ces deux essences le deuxième plus important groupement d'essences résineuses, après l'épinette noire, tel que présenté à la figure 3.



(Parent, 1996)

Figure 3: Volume total par groupe d'essences retrouvé au Québec

### 2.3.1) Sapin baumier

#### 2.3.1.1) Écologie

Le sapin baumier est l'un des conifères les plus importants du Canada et du nord des États-Unis, en raison de ses multiples usages commerciaux (pâtes et papier, construction, sapin de Noël) et de son utilisation par la faune (nourriture et abri) (Bakuzis et Hansen 1965; Burns et Honkala 1990). Au Canada, cette essence se retrouve de la province de Terre-Neuve jusqu'au nord-ouest de celle de l'Alberta (Burns et Honkala 1990).

La zone géographique où le sapin baumier connaît une meilleure croissance est située dans le sud-est du Canada et dans le nord-est des États-Unis (Bakuzis et Hansen 1965). Cette région se caractérise par ses températures fraîches de même que par sa grande humidité (Bakuzis et Hansen 1965). En effet, la croissance du sapin baumier est optimale lorsque la température moyenne annuelle est de 2° à 4° C et que les précipitations annuelles sont de l'ordre de 760 à 1100 mm (Bakuzis et Hansen 1965).

Le sapin baumier croît généralement sur une vaste gamme de dépôts organiques et minéraux, le plus souvent d'origine glaciaire, qui correspondent généralement au groupe des podzols

(Johnston 1986; Burns et Honkala 1990). Ces sols ont comme caractéristiques un humus de type mor épais ainsi qu'un horizon Ae bien développé, horizon éluvié dont le développement a été favorisé par d'abondantes précipitations, un climat frais et un couvert de conifères (Frank et Bjorkbom 1973).

Plusieurs agents dommageables tels les insectes, les champignons, le feu et le vent peuvent affecter la croissance du sapin baumier. Parmi les insectes, le plus important est de loin la tordeuse des bourgeons de l'épinette qui entraîne une défoliation plus ou moins sévère pouvant causer la mort de l'arbre (Schmitt et al 1984; Johnston 1986; Burns et Honkala 1990). Parmi les champignons de carie, c'est *Stereum sanguinolentum* [(Albertini & Schwein.:Fr) Pouzar] qui cause les plus grands dommages aux tiges (Bakuzis et Hansen 1965; Frank et Bjorkbom 1973; Johnston 1986; Burns et Honkala 1990; Basham 1991). Le feu peut, de son côté, être responsable de sévères dommages ou de mortalité, puisque le sapin baumier possède un système racinaire peu profond, une écorce résineuse mince ainsi que des aiguilles hautement inflammables, souvent situées à proximité du sol (Frank et Bjorkbom 1973; Burns et Honkala 1990). Ce système racinaire superficiel rend de plus le sapin baumier susceptible aux dommages causés par le vent (Frank et Bjorkbom 1973; Basham 1991).

#### 2.3.1.2) Résistance au renversement

De façon générale, chez les conifères, le risque de renversement par le vent est élevé lorsqu'un système racinaire superficiel est affaibli par de fortes précipitations et des rafales de vent (Johnston 1986; Burns et Honkala 1990). Ce risque est d'autant plus augmenté dans un peuplement traité par coupe partielle qui n'a pas été préalablement aménagé (Johnston 1986; Burns et Honkala 1990).

Le système racinaire du sapin baumier est souvent qualifié de superficiel, car il est le plus souvent confiné à l'humus et à la partie supérieure du sol minéral (Frank et Bjorkbom 1973; Basham 1991). Même sur un sol profond, les racines pénètrent rarement au-delà des premiers 60 à 75 centimètres du sol (Bakuzis et Hansen 1965). Les racines latérales du sapin baumier sont fortement développées et s'étendent dans toutes les directions sur une distance de 1,5

mètres ou plus et de façon générale, elles sont moins ramifiées que celles des épinettes (Bakuzis et Hansen 1965).

La plupart des chercheurs s'entendent sur le fait que certains bris de racines peuvent être associés aux oscillations des tiges dans le vent (Burns et Honkala 1990 : Whitney 1988). Toutefois, ce type de bris et les autres dommages infligés aux racines par l'oscillation des arbres au vent ne sont pas aussi importants que ce que laisse penser la croyance générale (Burns et Honkala 1990).

Chez le sapin baumier, les greffes racinaires sont communes et ont été fréquemment observées (Johnston 1986; Burns et Honkala 1990). Elles sont majoritairement le fruit de l'abrasion de l'écorce des racines des arbres soumis aux oscillations, de la compatibilité entre les racines ainsi que de la forte pression de croissance sur certains sites (Burns et Honkala 1990). Les greffes racinaires posent un risque d'infection, car elles créent des interruptions dans l'écorce qui constituent une porte d'entrée pour les champignons des carie de racines (Whitney 1988). De plus, elles peuvent propager la maladie d'un sapin infecté aux autres sapins qui lui sont greffés (Bakuzis et Hansen 1965).

### 2.3.1.3) Susceptibilité à la carie

Parmi tous les conifères de l'est du Canada, le sapin baumier est celui qui est le plus souvent affecté par les pourridiés (Whitney 1988; Whitney 1989; Basham 1991). Le problème de la carie chez le sapin baumier est très important et constitue souvent le facteur limitatif de son aménagement et de son utilisation (Lortie 1968).

Tel que mentionné précédemment, le champignon de carie qui cause les plus grands dommages aux tiges de sapin baumier est la carie rouge du sapin (*Stereum sanguinolentum* [(Albertini & Schwein.:Fr) Pouzar]) (Bakuzis et Hansen 1965; Frank et Bjorkbom 1973; Johnston 1986; Burns et Honkala 1990; Basham 1991). Cette carie se retrouve principalement au niveau du tronc, où elle peut s'étendre sur une longueur considérable (Bakuzis et Hansen 1965; Basham 1991). De façon occasionnelle, on la retrouve aussi au niveau de la souche (Bakuzis et Hansen 1965; Basham 1991). Les principales portes d'entrée qu'emprunte la carie

rouge, sont les blessures aux branches, les fourches, les têtes cassées, les gélivures ainsi que les autres blessures au tronc (Bakuzis et Hansen 1965; Frank et Bjorkbom 1973; Burns et Honkala 1990; Basham 1991). En Ontario, *Stereum sanguinolentum* représente près de 80% des défauts de tige chez le sapin baumier, les 20% restants étant attribués aux différents champignons de carie de souche (Basham 1991).

Même si les caries de souche et de racine ne sont pas responsables de pertes excessives en ce qui concerne les tiges sur pied, elles affaiblissent néanmoins les arbres, les rendant plus vulnérables au vent (Whitney 1976; Johnston 1986; Burns et Honkala 1990). Parmi les champignons causant la carie de souche, le plus important est *Corticium Galactinum*, suivi, par ordre d'importance, de *Ondonitia bicolor*, de *Armillaria* sp. (probablement *A. ostoyae*) et finalement de *Poria subacida* (Basham 1991). En Ontario, la carie cubique brune de la souche, causée principalement par *Coniophora puteana*, *Polyporus balsameus* et *Merulius himantioides*, est plus répandue chez le sapin baumier que chez tout autre conifère (Basham 1991).

Il semble que le sapin baumier soit plus affecté par la carie de racine que l'épinette blanche (Whitney 1976). Chez le sapin baumier, ce type de carie peut commencer à se développer avant 40 ans et augmenter par la suite avec l'âge des arbres (Whitney 1989; Burns et Honkala 1990).

Il n'existe aucun indicateur externe entièrement fiable pour indiquer la présence de carie, celle-ci étant souvent un défaut caché (Johnston 1986; Burns et Honkala 1990; Basham 1991; Silva et al 1998). De plus, les fructifications sont généralement rares sur les arbres vivants (Johnston 1986; Burns et Honkala 1990). Les meilleurs indicateurs externes de présence de carie sont les racines exposées ou endommagées, les blessures mécaniques, les gélivures, les fentes, les fourches et les cavités (Lortie 1968; Burns et Honkala 1990; Basham 1991; Pin et Ruel 1996; Silva et al 1998).

En dépit des différences de climat, de conditions de sol et de vitesse de croissance des arbres, des conclusions similaires sont énoncées en ce qui concerne l'âge auquel le sapin baumier

devrait être récolté afin d'éviter de sérieuses pertes dues à la carie, soit entre 70 et 80 ans (Basham 1991). Whitney (1989), en Ontario, propose de récolter les peuplements de sapin baumier avant 65 ans, pour prévenir des pertes supérieures à 35% en volume.

### **2.3.2) Épinette blanche**

#### **2.3.2.1) Écologie**

L'épinette blanche est une essence ayant une grande importance économique au Québec (Bertrand et Bolghari 1970) et son bois est principalement utilisé en construction ainsi que dans l'industrie des pâtes et papiers (Nienstaedt 1957; Anonyme 1987b; Burns et Honkala 1990). Au Canada, cette essence est présente de la province de Terre-Neuve à celle de la Colombie Britannique et atteint la limite septentrionale des arbres près de la Baie d'Hudson, à l'intérieur des Territoires du Nord-Ouest et du Yukon (Nienstaedt 1957; Sutton 1969).

L'épinette blanche se développe sous des conditions climatiques très variées, allant du climat maritime aux conditions continentales arides (Nienstaedt 1957). Sa saison de croissance peut atteindre 180 jours dans les régions les plus chaudes et se limiter à 20 jours dans les régions les plus froides du Canada (Burns et Honkala 1990).

L'épinette blanche croît sur une grande variété de sols d'origine glaciaire, lacustre, marine ou alluviale (Nienstaedt 1957; Burns et Honkala 1990). Sa croissance est optimale sur des sols loameux, mais elle peut aussi être bonne sur des sables ou des argiles, lorsque la quantité d'eau n'est pas un facteur limitant (Nienstaedt 1957). L'épinette blanche peut également croître sur des sols xériques, à condition qu'ils soient fertiles, mais elle préfère généralement des sols mésiques ou hydriques, dont la nappe phréatique n'est pas stagnante (Sutton 1969; Burns et Honkala 1990).

Les principaux agents dommageables pouvant affecter la dynamique des peuplements où croît l'épinette blanche sont, comme pour le sapin baumier, le feu, la tordeuse des bourgeons de l'épinette, les champignons de carie et le vent (Frank et Bjorkbom 1973; Burns et Honkala 1990). C'est en raison de son système racinaire peu profond, de son écorce mince et de ses aiguilles inflammables que les épinettes de tous âges sont facilement tuées par le feu (Frank et



Bjorkbom 1973). Bien qu'elle préfère le sapin baumier, la tordeuse des bourgeons de l'épinette s'attaque aussi à l'épinette blanche et, lors d'une défoliation sévère, la croissance des arbres peut être réduite, jusqu'à entraîner la mort (Frank et Bjorkbom 1973; Burns et Honkala 1990). Parmi les champignons de carie s'attaquant à l'épinette blanche, les plus importants sont *Fomes pini* et *Polyporus schweinitzii* (Nienstaedt 1957; Frank et Bjorkbom 1973). Le vent peut entraîner des pertes considérables dans les peuplements d'épinettes blanches, lorsque ceux-ci se sont développés sur des sols minces ou à drainage imparfait (Nienstaedt 1957; Burns et Honkala 1990).

#### 2.3.2.2) Résistance au renversement

Chez l'épinette blanche, la texture du sol ainsi que le drainage sont deux des facteurs qui influencent le plus le risque de chablis (Burns et Honkala 1990). C'est pourquoi ceux-ci sont fréquents dans les peuplements fortement éclaircis se trouvant sur sols minces ou imparfaitement drainés, où les systèmes racinaires des épinettes sont superficiels (Nienstaedt 1957; Sutton 1969; Burns et Honkala 1990). L'épinette blanche est beaucoup plus résistante aux dommages par le vent là où elle peut développer une racine pivotante, des racines secondaires plongeantes ou un système racinaire multi-étagé (Sutton 1969; Burns et Honkala 1990).

Le système racinaire de l'épinette blanche est principalement formé de longues racines latérales munies de courtes radicelles (Sutton 1969). Sa forme est très souvent aplatie, en raison de la capacité de l'épinette à coloniser des sites humides. Ceci explique la raison pour laquelle son système racinaire est généralement défini dans la littérature comme peu profond (Sutton 1969; Burns et Honkala 1990). Bien que la profondeur d'enracinement varie généralement entre 90 et 120 cm, des racines pivotantes et des pivots secondaires peuvent atteindre une profondeur de 3 m (Burns et Honkala 1990). Habituellement, sous nos latitudes, 85% de la masse racinaire de l'épinette blanche se situe dans les premiers 30 cm du sol (Burns et Honkala 1990). Dans les sites les plus nordiques, les grosses racines se concentrent plutôt dans les premiers 15 cm de l'horizon organo-minéral du sol (Burns et Honkala 1990).

Tout comme chez le sapin baumier, et pour les mêmes raisons, les greffes racinaires sont

communes chez l'épinette blanche (Burns et Honkala 1990).

### 2.3.2.3) Susceptibilité à la carie

Parmi les champignons de carie s'attaquant à l'épinette blanche, les plus importants sont *Fomes pini* et *Polyporus schweinitzii* (Nienstaedt 1957; Frank et Bjorkbom 1973). Le premier est un champignon qui provoque une carie de cœur et qui entre par les chicots de branches alors que le second est un champignon qui pénètre principalement par les blessures à la base de l'arbre et qui amène la formation de carie de pied (Frank et Bjorkbom 1973). *Stereum sanguinolentum* est un autre agent important de carie de tronc, bien qu'il ne surpasse pas *Fomes pini* (Nienstaedt 1957).

## 2.4) ÉTUDES ANTÉRIEURES POUR SIMULER L'ACTION DU VENT

La réponse des arbres à la sollicitation du vent a été étudiée de différentes façons, allant de l'observation de la réaction tiges face au vent (Gardiner 1994; Hassinen et al 1998) à la création de modèles utilisées en soufflerie (Fraser 1962b; Quine et Gardiner 1998), et aux simulations informatiques (Peltola et Kellomäki 1993; Kerzenmacher et Gardiner 1998) et mécaniques (Fraser 1962a; Fraser et Gardiner 1967; Mayhead 1973; Smith et al 1987; Fredericksen et al 1993; Krasowski et al 1996; Silva et al 1998).

Parmi toutes les méthodes utilisées pour simuler l'action du vent sur les tiges, le treuillage est celle permettant le mieux de mesurer l'ensemble des forces servant à renverser ou briser l'arbre et par conséquent, d'établir sa résistance. L'objection la plus commune aux essais de treuillage réside dans le fait qu'une force statique (qui augmente de façon constante dans le temps) est appliquée, alors que les rafales de vent font osciller l'arbre et son système racinaire de façon dynamique (forces qui changent d'intensité et de direction dans le temps) (Coutts 1983; Deans et Ford 1983; Gere et Timoshenko 1990; Fredericksen et al 1993). Toutefois, comme aucune étude n'a encore permis d'établir de différences entre les dommages aux racines et au sol des arbres treuillés et de ceux renversés par le vent, il est approprié de penser que le treuillage peut donner des résultats satisfaisants (Coutts 1983). De plus, des expériences préliminaires durant lesquelles les arbres ont été déracinés par une série de tractions et de relâchements (simulation d'oscillation) ont donné des résultats similaires à la traction en continu (Coutts 1983).

### 2.4.1) Modèle statique

Le modèle statique est un modèle qui simule l'action d'une rafale de vent dont la force serait suffisante pour renverser ou briser un arbre. Ce modèle est utilisé en raison de la difficulté qu'ont les expérimentateurs à simuler l'action du vent et des rafales (Fraser 1962a).

La méthodologie utilisée pour simuler le vent de façon statique a été développée par Fraser en 1962 et permet d'étudier à la fois les caractéristiques du système racinaire et les caractéristiques mécaniques des arbres. Cette méthodologie a par la suite été reprise par Fraser et Gardiner (1967), Smith et al (1987), Fredericksen et al (1993), Krasowski *et al.*(1996) et plus récemment au Québec, par Silva et al (1998). Les premiers développements du modèle de treuillage statique visaient à déterminer la possibilité de prédire le risque de chablis en mesurant la résistance de l'épinette de Sitka (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) et du sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) au treuillage (Fraser 1962a). Des tests préliminaires ont démontré que lorsque la traction était appliquée trop lentement, la force nécessaire pour maintenir un arbre dans une position donnée diminuait en fonction du temps passé dans cette position; il a donc été convenu, pour les tests suivants, d'appliquer la force le plus rapidement possible. Dans le cadre de cette étude, le câble était attaché au tiers de l'arbre (mesuré à partir du sol), ce qui correspondait au centre de gravité théorique d'un conifère idéal. Un treuil manuel était alors utilisé et la traction appliquée était notée à chaque degré d'inclinaison de l'arbre. Par la suite, le moment maximal était calculé au niveau du sol, en considérant la force gravitationnelle induite par le déplacement de l'arbre.

Plus tard, la méthodologie développée par Fraser (1962a) a été reprise par Smith et al (1987), qui ont étudié la résistance au chablis de l'épinette noire, mais cette fois, les auteurs ont exprimé le moment critique en fonction de la hauteur, de la hauteur dominante du peuplement ainsi que de la densité du peuplement. Ces variables étaient considérées comme facilement mesurables sur le terrain et plus utiles que le poids de la tige pour des besoins d'aménagement. Dans cette étude, le poids total de l'arbre et la force induite par la gravité n'étaient pas considérés dans le calcul du moment critique.

La méthodologie utilisée lors de l'étude de Fredericksen et al (1993), qui portait sur la résistance au chablis du pin à encens (*Pinus taeda* L.), était semblable à celle de Smith et al (1987). Toutefois, lors du treuillage, les câbles reliant l'échantillon aux deux treuils étaient attachés à mi-hauteur de l'arbre. Tout comme dans l'étude de Smith et al (1987), le calcul du moment critique a été réalisé sans considérer le poids de la cime.

Au Québec, l'étude de Silva et al (1998) s'est également basée sur l'étude de Fraser (1962a) et portait sur l'influence des défauts externes sur la stabilité du sapin baumier, du bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) et du peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.) face à une simulation mécanique du vent. Dans le cadre de cette étude, plusieurs modifications à la méthodologie ont été apportées:

- le câble était attaché à mi-hauteur de l'arbre à l'aide d'une poulie;
- la force était mesurée par une cellule de charge et enregistrée par un système d'acquisition de données;
- le déplacement de la tige durant le treuillage a été filmé, dans le but de mesurer le déplacement du centre de gravité et du point d'attache du câble;
- ces images servaient à tenir compte de la force gravitationnelle induite par le câble et l'arbre dans le calcul du moment critique.

Parmi les principaux résultats obtenus de toutes ces études de treuillage, il est apparu que le moment maximal augmentait en fonction de la taille de l'arbre (Fraser 1962a; Fraser et Gardiner 1967; Smith et al 1987; Fredericksen et al 1993; Silva et al 1998). Il était donc nécessaire de déterminer la meilleure expression de la taille de l'arbre. Parmi les variables expliquant le mieux la taille de l'arbre, le poids de la tige a été retenu lors des études de Fraser (1962a) et de Fraser et Gardiner (1967), la hauteur totale combinée au poids de la cime verte était utilisée par Smith (1987), alors que Fredericksen (1993) et Silva (1998) ont utilisé le poids total de l'arbre. Dans ces études, le moment maximal était fortement corrélé à la variable décrivant la taille de l'arbre.

D'autres conclusions importantes, peuvent être tirées de ces études:

- il y a absence de relation significative entre le moment critique et la direction du

- treuillage (Fraser 1962a);
- il y a une relation significative entre le moment critique et le type de sol sur lequel l'arbre pousse;
  - il y a une relation significative entre le moment critique et le défilement des tiges (Fredericksen et al 1993; Silva et al 1998).

Ces conclusions s'appuient sur des considérations mécaniques de base telle que celles définies par Metzger (1893 dans Assmann 1970), qui stipule qu'un arbre peut être considéré comme une poutre encastree de résistance uniforme à la flexion imposée par le vent. Pour que cette poutre reste stable, la force qui lui est transmise par le vent ( $F_w$ ) ne doit pas dépasser la contrainte maximale en flexion ( $\sigma_{\max}$ ) dans le cadre d'un comportement élastique (Niklas 1992), tel que présenté à l'équation 1:

$$F_w \approx (\sigma_{\max} I) / (R l) \quad [1]$$

$F_w$  : Force du vent (N)

$\sigma_{\max}$  : Contrainte maximale en flexion (N/m<sup>2</sup>)

$I$  : Moment d'inertie (m<sup>4</sup>)

$R$  : Rayon (m)

$l$  : Longueur (m)

Pour une tige cylindrique, le moment d'inertie se calcule à l'aide de l'équation 2:

$$I = \pi R^4 / 4 \quad [2]$$

Il est alors possible de combiner 1 et 2 pour obtenir l'équation 3:

$$F_w \approx (\pi \sigma_{\max} R^3) / (4 l) \quad [3]$$

Il en ressort que la force maximale supportée par une tige cylindrique augmente en fonction du cube du rayon et diminue en fonction de la longueur (Niklas 1992). Il est donc normal que le

moment critique soit corrélé au *DHP*, à la hauteur totale de même qu'à toutes les variables qui sont corrélées au *DHP* et à la hauteur totale.

De même en est-il dans le cas d'une colonne cylindrique où la résistance à la flexion est le produit du module d'élasticité et du moment d'inertie (Niklas 1992; Fredericksen et al 1993; Wood 1995). Comme le module d'élasticité est lié à la densité du bois (Mosbrugger 1990) et que le moment d'inertie est une fonction du rayon élevé à la quatrième puissance (Niklas 1992; Fredericksen et al 1993), le moment critique devrait être corrélé au poids total (*W*) (Fredericksen et al 1993).

Que le moment critique soit étroitement corrélé à la taille de l'arbre est en accord avec la théorie de la croissance adaptative, qui se résume dans le fait que l'arbre passe son existence à préserver une structure optimale (Mattheck 1991; Wood 1995). Cette structure optimale possède toujours comme caractéristique une contrainte homogène, c'est à dire que les charges sont également distribuées et qu'aucun point n'est prédéterminé à faillir (la rupture peut se produire en tout point) (Mattheck 1991; Wood 1995). Tout au long de son existence, l'arbre maintient ou rétablit son état de contrainte homogène sur toute sa surface, en s'adaptant continuellement aux forces extérieures auquel il est exposé (Mattheck 1991; Wood 1995).

Ce fut Metzger (1893 dans Mosbrugger 1990), qui fut le premier à émettre l'hypothèse que le défilement des troncs d'arbres s'ajustait de façon à ce que la contrainte due à la flexion demeure constante sur toute la tige. Dans le même sens, Leiser et Kemper (1973) ainsi que Niklas (1992) mentionnent que la contrainte en tension est minimale et distribuée de façon plus uniforme lorsque le défilement de la tige est de l'ordre de -0,60 (0,00 représentant une tige de défilement nul et -1,00 un défilement maximum).

De plus, la croissance secondaire des cernes annuels d'un arbre modifie le diamètre et les propriétés du bois de façon à ce que la résistance à la flexion augmente d'année en année (Niklas 1992). Dans le cas des troncs d'arbres, le rapport du diamètre sur la hauteur augmente de façon annuelle à mesure que les couches de croissance secondaire sont déposées (Niklas 1992), ce qui implique que la résistance à la flexion ne pourra qu'augmenter. L'ajout séquentiel

de bois secondaire et d'écorce font aussi augmenter le moment d'inertie et modifient le module d'élasticité, ce qui affecte la résistance en flexion (Niklas 1992)

## **RÉSISTANCE AU RENVERSEMENT CHEZ LE SAPIN BAUMIER ET L'ÉPINETTE BLANCHE**

### **3.1) INTRODUCTION**

Au Québec, durant les années 1993 à 1995, le chablis a entraîné des pertes de revenus en droits de coupe, pour le gouvernement, de près de 579 000\$ (Parent 1996). Ce montant ne comprend pas les milliers de dollars supplémentaires qui auraient pu être associés aux volumes de bois affectés par des chablis partiels et qui ne sont pas récupérés. Plusieurs auteurs s'entendent sur le principe qu'une sylviculture mieux adaptée aux essences et aux caractéristiques des peuplements pourrait réduire les dommages engendrés par les chablis partiels (Fraser 1962a; Busby 1965; Somerville 1980; Savill 1983; Quine et al 1995; Ruel 1995) et par le fait même, améliorer la productivité forestière.

Lors de traitements sylvicoles, tels que les coupes d'éclaircie et les coupes progressives, il est important de considérer la vulnérabilité au chablis des espèces ligneuses présentes afin de limiter les dommages dus au vent. Malheureusement, cette information n'est présentement pas disponible, et c'est pourquoi la présente étude visait 1) à déterminer la résistance au renversement du sapin baumier et de l'épinette blanche, 2) à déterminer quelle caractéristique liée à la taille de l'arbre (poids total, poids de la tige, hauteur, diamètre à hauteur de poitrine, etc.) était la mieux corrélée au moment de force critique, 3) à déterminer si un champignon de carie pouvait être responsable d'une diminution de la résistance des arbres étudiés et 4) à comparer la résistance au renversement du sapin baumier et de l'épinette blanche. Cette étude pourrait éventuellement permettre d'effectuer la sélection de certaines essences ou tiges à conserver lors des coupes partielles.

Les hypothèses de recherche étaient les suivantes:

1. la résistance au renversement du sapin baumier et de l'épinette blanche est fonction de la taille de l'arbre;
2. parmi les caractéristiques liées à la taille de l'arbre, le poids total est celle qui est la mieux corrélée au moment de force critique;



3. la présence de champignons de carie au point de rupture de la tige ou des racines peut être responsable d'une perte de résistance chez les sapins baumiers et les épinettes blanches treuillées;
4. la résistance au renversement du sapin baumier est comparable à celle de l'épinette blanche lorsque ces deux essences sont présentes sur un même site;

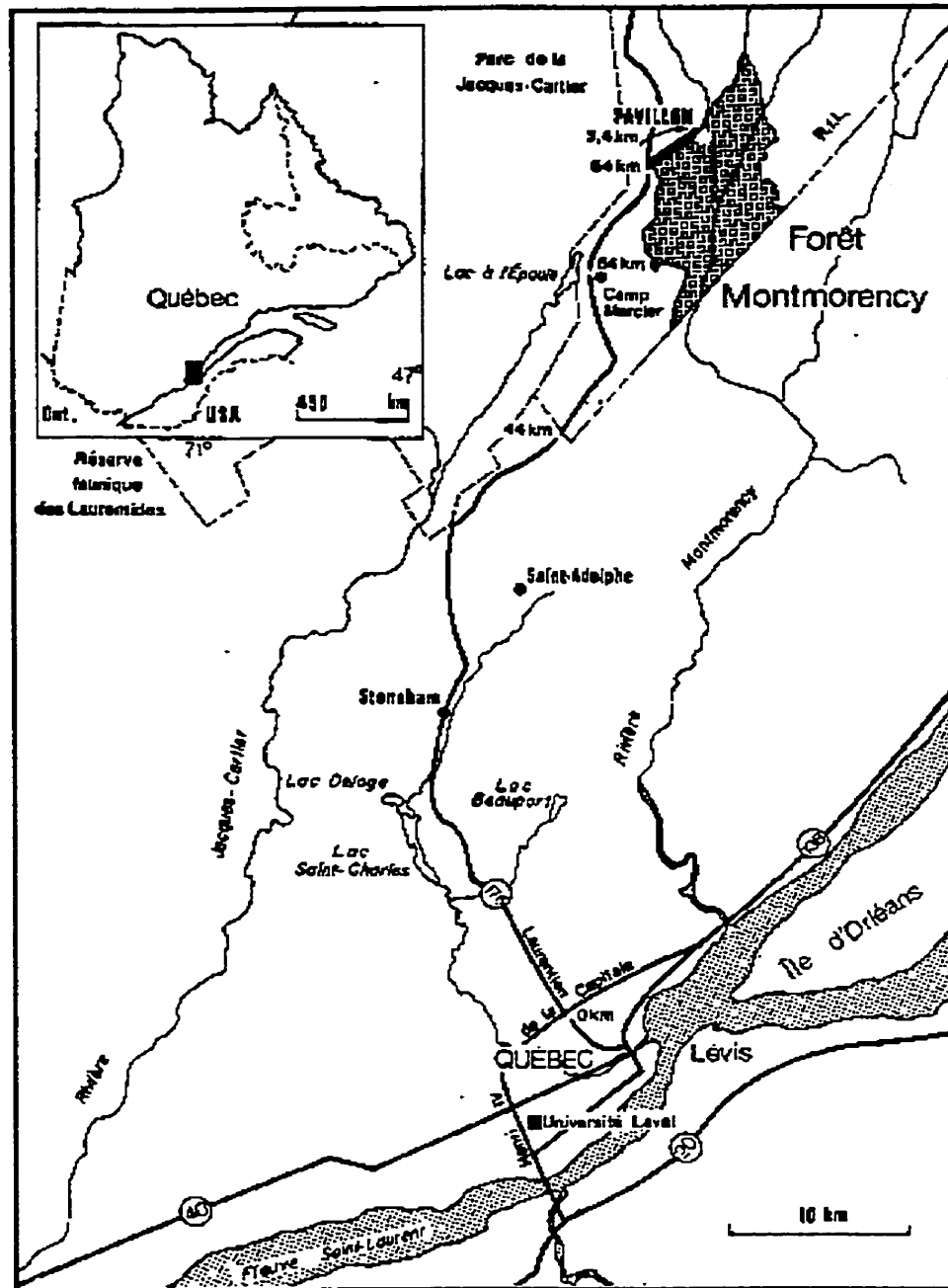
## **3.2) MÉTHODOLOGIE**

### **3.2.1) Localisation de la recherche**

Le dispositif expérimental de cette étude était situé à la Forêt Montmorency, dans le massif des Laurentides, à quelque 70 km au nord de la ville de Québec (figure 4). La Forêt Montmorency est localisée à une latitude s'étendant de 47° 13' à 47° 22' nord; et une longitude s'étendant de 71° 05' à 71° 11' ouest (Bélanger et al 1991). La Forêt Montmorency se trouve dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc, région écologique 8f-Moyennes-Laurentides-de-la-Jacques-Cartier (Thibault 1985; Bélanger et al 1995). Les données climatologiques enregistrées par la station météorologique de la Forêt Montmorency depuis 1966 indiquent que la température moyenne annuelle y est de 0,3° C et que les précipitations annuelles totales sont en moyenne de 1416,5 mm (Bélanger et al 1991).

Les dépôts dominants de la Forêt Montmorency sont le résultat de l'action érosive des glaciers et sont caractérisés par un matériel morainique d'une importante hétérogénéité texturale (Bélanger et al 1991). En raison de la pluviométrie et de la longueur des pentes, le drainage oblique (*seepage*) est relativement fréquent (Bélanger et al 1995).

La répartition en volume des essences ligneuses sur ce territoire est la suivante: 75% est constitué de sapin baumier, 10% d'épinette blanche, 3% d'épinette noire et 12% de feuillus intolérants (Bélanger et al 1991).



Édition infographique par J.-Robert Thibault (mars 1995)

<http://forestgeomat.ffg.ulaval.ca/montmorency/carte.html>

Figure 4: Localisation de la Forêt Montmorency

### 3.2.2) Sélection des sites

Les peuplements recherchés pour la réalisation de cette étude devaient correspondre aux critères de sélection suivants:

- sapinières composées d'au moins 5 % d'épinettes blanches;
- hauteur moyenne des dominants et codominants de 13 mètres pour deux sites et de 15 mètres pour les deux autres, hauteurs auxquelles les peuplements de sapins et d'épinettes sont susceptibles de subir une coupe partielle;
- sites mésiques
- dépôt de till régional épais où s'est développé un podzol
- texture de loam sableux ou de sable loameux
- drainage modéré (classe 3), tel qu'utilisé dans la terminologie forestière québécoise (Anonyme 1994a), ne présentant pas d'écoulement latéral (*seepage*).

Pour répondre à ces critères, il a fallu localiser les sites potentiels sur la carte écoforestière de la Forêt Montmorency (échelle de 1 : 10 000) (Bolduc et Bouchard 1996). Après avoir repéré les sites potentiels, une vérification terrain a été réalisée. En tout, 22 virées ont été réalisées dans le but de localiser quatre sites facilement accessibles, correspondant aux critères de sélection.

Une fois chaque site repéré et contrôlé, les caractéristiques du peuplement ont été notées par l'établissement d'une parcelle échantillon circulaire de 0,04 ha (rayon de 11,28 m). Dans cette parcelle, toutes les tiges marchandes (de plus de 10 cm au DHP) ont été numérotées, dénombrées, et leur diamètre à hauteur de poitrine mesuré. Un pèdon a ensuite été creusé afin de déterminer la nature du dépôt et du drainage.

La sélection des arbres à treuiller a été effectuée au hasard parmi les tiges dominantes et codominantes du peuplement qui étaient exemptes de défaut apparent (chancre, champignon, fente non cicatrisée). Une distance de quatre à cinq mètres a été laissée entre chaque échantillon, de manière à ce que le treuillage de chaque arbre n'affecte pas la résistance des autres, en affaiblissant son système racinaire. En tout, 84 tiges dont le diamètre à hauteur de poitrine variait entre 11 et 30 cm et la hauteur entre 11 et 20 mètres ont été retenues. Ces 84

tiges étaient réparties sur quatre sites, à raison de 10 tiges par espèce, pour chaque site. Certaines tiges supplémentaires ont été choisies afin de servir de sujet de remplacement en cas de problèmes avec des données incomplètes.

### 3.2.3) Description des sites

#### 3.2.3.1) Peuplements

Les peuplements échantillonnés étaient des sapinières à herbacées, telles que décrites par Bélanger (1997). Ces peuplements étaient tous dans la classe d'âge de 50 ans et possédaient une classe de densité B (60 à 80% de recouvrement). Le tableau suivant présente les principales caractéristiques des tiges des sites échantillonnés.

Tableau 1: Principales caractéristiques dendrométriques des arbres treuillés sur les quatre sites de treuillage

Site	Âge moyen (an)	Âge moyen depuis la perturbation (an)	Hauteur moyenne (m)	Diamètre moyen (cm)	Densité du peuplement (ti/ha)
1	63	51	14.7	20.1	1750
2	50	46	13.4	15.7	2375
3	50	50	13.4	15.5	2175
4	87	57	16.3	21.9	2175

#### 3.2.3.2) Sol

Conformément aux critères de sélection, les peuplements choisis croissaient sur des tills régionaux épais (1A) dont la texture était un sable loameux ou un loam sableux, dont le drainage était modéré (3) et ne présentait pas d'écoulement latéral (*seepage*) (Bélanger et al 1997). Le tableau 2 présente les principales caractéristiques pédologiques des sites étudiés.

Tableau 2: Principales caractéristiques pédologiques des sites de treuillage

Site	Profondeur du sol minéral (cm)	Épaisseur de l'humus (cm)	Épaisseur de l'horizon Ae* (cm)	Épaisseur de l'horizon B* (cm)	Inclinaison de la pente (%)
1	+ de 48	9	4	+ de 35	1
2	+ de 79	11	3	+ de 65	22
3	+ de 60	11	4	+ de 45	1,5
4	+ de 128	12	6	100	3

\* Selon le système canadien de classification des sols (Anonyme 1987a)

### 3.2.3.3) Qualité de station

Le tableau 3 présente les indices de qualité de station (*IQS*) des sites de treuillage, tels que mesurés avec l'équation de Pothier et Savard (1998) et l'équation de l'abaque des classes de fertilité du sapin et de l'épinette noire du Ministère des Ressources naturelles (MRN) (Anonyme 1992), qui se basent respectivement sur la hauteur dominante et l'âge corrigé à un mètre ainsi que sur l'âge à la souche et la hauteur de l'arbre.

Tableau 3: Indice de qualité de station de Pothier et Savard (1998) et du Ministère des Ressources naturelles (Anonyme 1992) pour le sapin baumier

Site	<i>IQS</i>	
	Pothier et Savard (m)	MRN (classe)
1	15,77	1,21
2	13,94	1,22
3	13,08	1,66
4	16,95	1,17

Lors du calcul des indices de qualité de station pour le site 4, l'âge utilisé est le nombre d'années de croissance sans oppression du peuplement, auquel 10 années ont été ajoutées pour déterminer l'âge à 1 mètre, âge utilisé dans les équations de Pothier et Savard (1998).

### **3.2.4) Méthodologie de treillage**

#### **3.2.4.1) Provenance de la méthode et ajustements effectués**

La méthodologie utilisée lors de cette expérience a été élaborée par Silva et al (1998) et est décrite dans le mémoire issu de cette étude (Silva 1996). Dans le cadre de la présente étude, certaines modifications méthodologiques ont toutefois été réalisées, dont une simplification du modèle consistant à éliminer le poids du câble du calcul du moment de force, celui-ci étant jugé négligeable par Silva (1996), en raison du fait que le poids du câble ne représente qu'une infime partie de l'erreur sur la contrainte.

#### **3.2.4.2) Hypothèses simplificatrices**

Le treillage donne lieu à des réactions complexes à l'intérieur des arbres. Il est donc nécessaire de développer un modèle qui permet de convertir la réalité en un système mécanique approximativement équivalent dont le comportement pourra être décrit par des équations mathématiques simples (Silva 1996). Pour ce faire, certaines simplifications sont nécessaires.

La figure 5 représente l'arbre avant le treillage et servira de référence lors de l'élaboration des équations. Sur cette figure, l'axe des  $Y$  correspond à la position moyenne du centre de la tige avant le treillage et l'axe des  $X$  pointe le treuil, soit la direction de la chute de l'arbre.

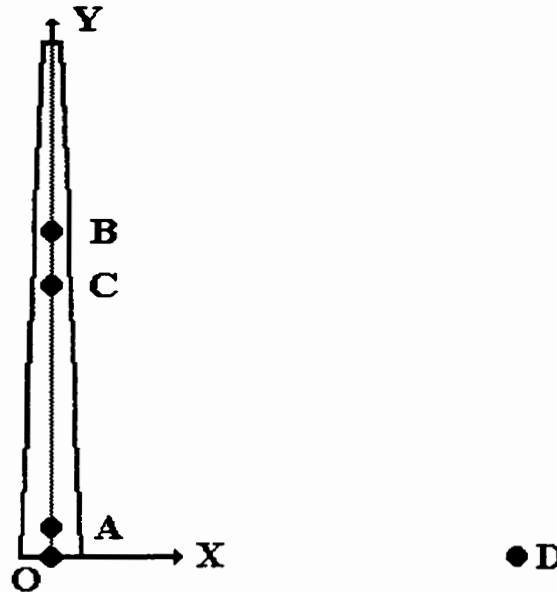


Figure 5: Principaux points du système de treillage

Les principaux points utilisés dans le système mécanique identifiés sur la figure 5, se définissent ainsi:

- A* : le point de rupture (semblable à *O* si l'arbre est renversé);
- B* : le point d'attache entre le câble et l'arbre;
- C* : le centre de gravité de la portion située au-dessus du point *A*;
- D* : la position du treuil;
- O* : la base de l'arbre.

Il est à noter que les points *A*, *B*, *C* et *O* sont situés sur l'axe des *Y*, c'est-à-dire au centre de la tige.

L'application de ce modèle pour le calcul du moment de force critique est définie par les hypothèses suivantes:

1. La force de treillage est appliquée dans un plan à deux dimensions (*X,Y*) et l'arbre ne peut se déformer que dans ce plan.
2. L'arbre n'est obstrué par aucune autre force au cours de l'essai de sorte que la seule force externe appliquée est celle transmise par le câble.
3. La base de l'arbre (*O*) et la position du treuil (*D*) ne se déplacent pas lors du treillage.
4. La position relative du centre de gravité (*C*) demeure constante lors du treillage.

5. Le câble est considéré comme un corps rigide (la ligne joignant les points  $B$  et  $D$  est une droite) durant le treuillage (voir figure 6) .
6. La charge est appliquée de façon quasi statique; les effets d'inertie sont donc négligeables.
7. La section transversale de l'arbre est représentée par un cercle.
8. Les contraintes de compression engendrées au point de rupture par le poids de l'arbre et par la composante verticale de la force de treuillage sont négligeables.

La figure 6, qui représente l'arbre au moment où la force enregistrée est maximale, présente les principaux paramètres de base du modèle où:

$l$  : distance entre les points  $B'$  et  $D$

$W$  : poids de la partie de l'arbre située au-dessus du point  $A'$

$T$  : force de traction dans le câble, mesurée au niveau du point d'attache ( $B$ )

$d$  : diamètre de la tige mesuré au niveau du point  $A'$

$L$  : distance entre le treuil et la base de l'arbre, mesuré au niveau du sol (segment  $OD$ )

$\alpha$  : angle de dénivellation du terrain entre le treuil et la base de l'arbre (angle que fait le segment  $OD$  avec l'horizontale)

$x_{A'}, y_{A'}$  : coordonnées du point  $A$  lorsque la force mesurée est maximale

$x_{B'}, y_{B'}$  : coordonnées du point  $B$  lorsque la force mesurée est maximale

$x_{C'}, y_{C'}$  : Coordonnées du point  $C$  lorsque la force mesurée est maximale



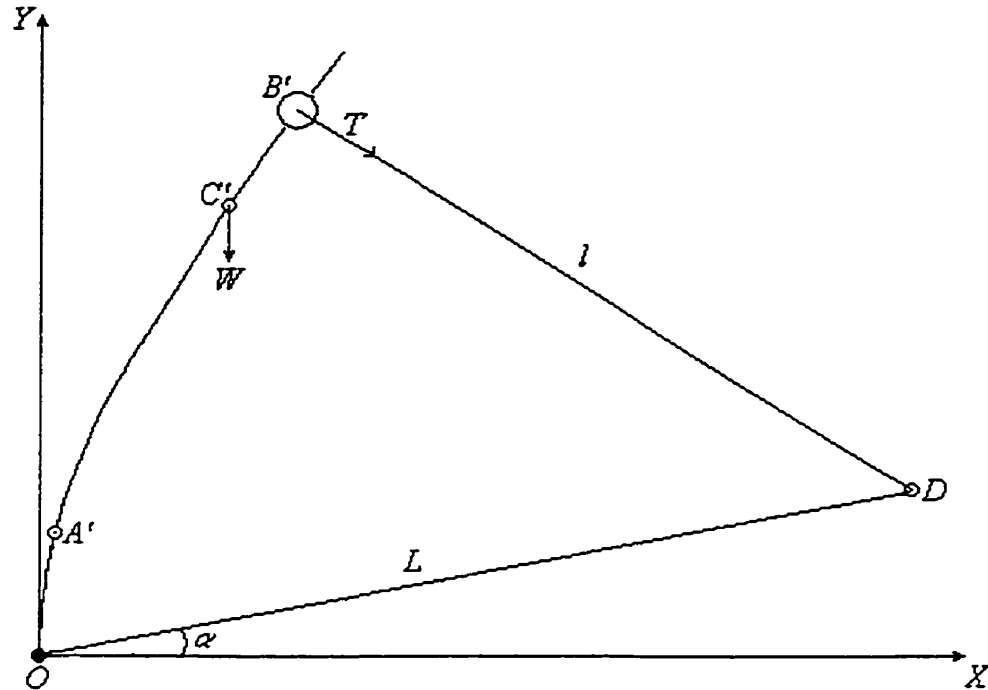


Figure 6: Principaux paramètres de base du modèle

#### 3.2.4.3) Modèle mathématique

Dans le cadre d'une étude de treillage, l'arbre est soumis à la fois à des forces de flexion, de compression et de cisaillement. (Silva 1996). Afin de simplifier les calculs, le modèle mathématique utilisé a été développé en considérant les contraintes de compression et de cisaillement comme très petites face aux contraintes de flexion, ce qui a permis de les éliminer du calcul (Silva 1996). Le modèle mathématique servant à estimer le moment critique est donc basé sur l'application de forces n'induisant qu'un moment de flexion.

Par ailleurs, comme dans la présente étude 78 des 84 tiges étudiées ont été déracinées et non cassées c'est le moment de force qui a été utilisé pour les analyses statistiques et non la contrainte de rupture. Si les tiges s'étaient majoritairement brisées, l'utilisation de la contrainte de rupture aurait été plus appropriée, car elle permet de comparer les forces entre elles sur une même base de surface. Il est ainsi possible de tenir compte des variations de diamètre des tiges formant l'échantillon (Silva et al 1998).

Le modèle mathématique utilisé est basé sur l'équilibre des forces en statique et permet de déterminer le moment de force appliqué à l'arbre par le treuil et la force gravitationnelle, lorsque la force en traction atteint son maximum. Il est alors possible de déterminer le moment critique ( $M_c$ ), qui est le moment de force maximal pouvant être appliqué à un arbre par le vent ou tout autre force avant que ce dernier ne se brise ou ne se renverse (Fredericksen et al 1993).

La figure 7 montre le diagramme de corps libre de l'arbre à l'instant où le moment maximal est atteint. À cet instant, le câble fait un angle  $\theta$  par rapport à l'horizontale. Les projections de la force  $T$  sur l'horizontale et la verticale sont donc respectivement:

$$T_x = T \cos \theta \quad [4]$$

$$T_y = T \sin \theta \quad [5]$$

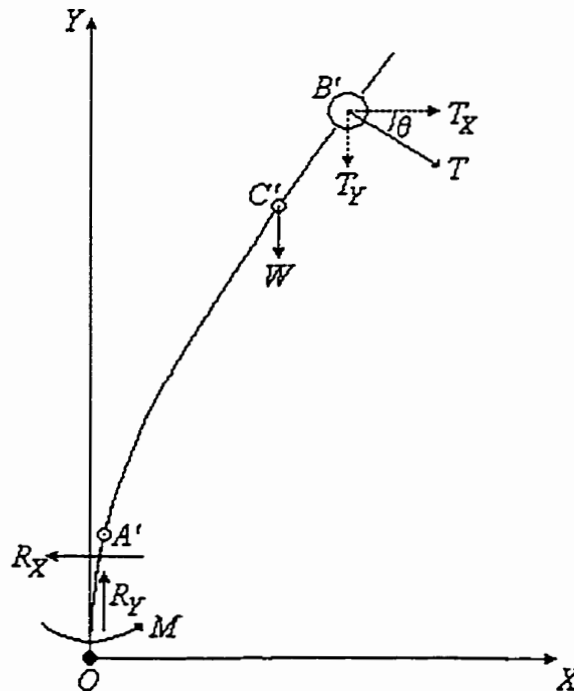


Figure 7: Diagramme de corps libre lorsque le moment maximal est atteint

Soit  $R_X$  et  $R_Y$  les forces de réaction selon l'horizontale et la verticale au point A, et  $M$  le moment de réaction au point A. L'équilibre des forces selon l'horizontale ( $\Sigma F_X = 0$ ) et la verticale ( $\Sigma F_Y = 0$ ) nous permet de d'écrire les forces de réaction en fonction des forces de traction et du poids de la tige:

$$R_X = T_X \quad [6]$$

$$R_Y = T_Y + W \quad [7]$$

L'équilibre des moments par rapport au point A donne:

$$M = T_X (y_{B'} - y_{A'}) + T_Y (x_{B'} - x_{A'}) + W (x_{C'} - x_{A'}) \quad [8]$$

Il est à noter qu'afin de s'assurer qu'un changement dans la direction du treuillage n'affecte pas le calcul du moment ( $M$ ), les valeurs absolues de  $y_{B'} - y_{A'}$ , de  $x_{B'} - x_{A'}$  et de  $x_{C'} - x_{A'}$  doivent être utilisées dans l'équation 8.

La figure 8 présente la façon dont est calculé l'angle  $\theta$ , qui est fonction de la position du point d'attache entre le câble et l'arbre ( $B'$ ) et de la position du treuil ( $D$ ), lorsque la force enregistrée est maximale. Pour trouver cet angle, l'enregistrement vidéo est nécessaire, car les coordonnées du point  $B'$  ( $x_{B'}$ ,  $y_{B'}$ ) proviennent de l'analyse de l'image prise au moment où la force est maximale. Pour leur part, les coordonnées du point  $D$  ( $x_D$ ,  $y_D$ ) s'obtiennent par trigonométrie à partir des paramètres  $L$  et  $\alpha$ , de la même façon que  $T_X$  et  $T_Y$ , soit à l'aide des équations suivantes:

$$x_D = L \cos \alpha \quad [9]$$

$$y_D = L \sin \alpha \quad [10]$$

À partir de ces informations, l'angle  $\theta$  peut être trouvé à partir des coordonnées des points  $B'$  et  $D$  à l'aide de la relation suivante:

$$\theta = \tan^{-1} ((y_{B'} - y_D) / (x_D - x_{B'})) \quad [11]$$

De la même façon que pour le calcul du moment ( $M$ ), les valeurs absolues de  $y_{B'} - y_D$  et de  $x_D - x_{B'}$  doivent être utilisées dans l'équation 11.

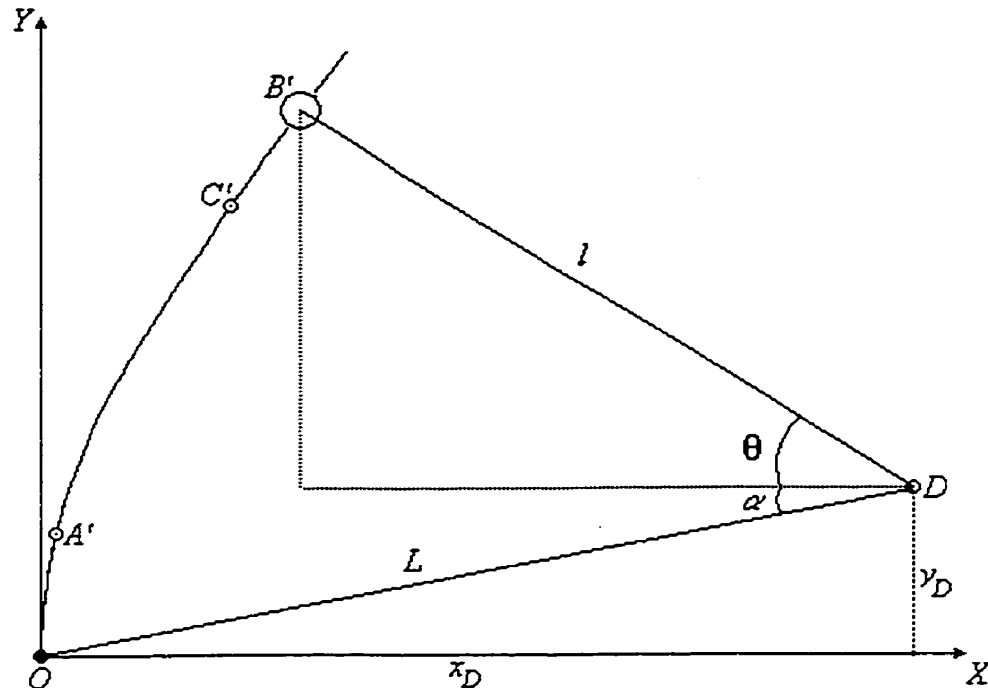


Figure 8: Calcul de  $\theta$  et des coordonnées du point  $D$  à partir de la dénivellation ( $\alpha$ ) et de la distance ( $L$ ) entre l'arbre et le treuil

Les équations 4 à 11 sont des équations générales et sont valables pour n'importe quelle expérience de treillage tant que les forces et les déplacements sont compris dans un plan.

#### 3.2.4.4) Adaptations du modèle en fonction du protocole utilisé

En raison du protocole utilisé, certains paramètres de base ne sont pas directement accessibles; c'est le cas de la force  $T$  ainsi que des coordonnées des points  $A$ ,  $B$ , et  $C$ . En effet, une des particularités du protocole de treillage est que la force  $T$  n'est pas mesurée au niveau de l'arbre mais bien au niveau du treuil, par la cellule de charge. La figure 9, illustre le mécanisme d'application de la force et montre l'emplacement de la cellule de charge et donc de l'enregistrement de cette force.

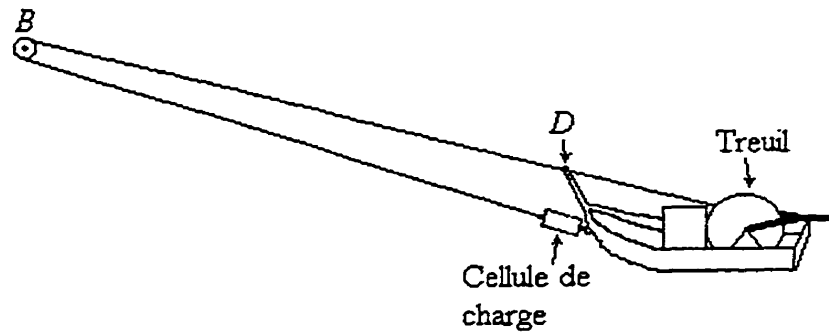


Figure 9: Schéma illustrant le mécanisme d'application de la force.

Comme l'illustre la figure 9, le câble servant au treuillage est double, car il est attaché à l'arbre au point  $B$  à l'aide d'une poulie. Toutefois, la force enregistrée par la cellule de charge n'est mesurée que dans un seul brin (le brin fixe), près du point  $D$ . Puisque la vitesse d'enroulement du treuil est faible et qu'il est possible de considérer que la friction dans la poulie au point  $B$  est négligeable, il est possible d'admettre pour les calculs que la force  $T$ , à utiliser dans les équations [4] et [5], est le double de la force enregistrée par la cellule de charge.

### 3.2.5) Description du matériel

#### 3.2.5.1) Le treuil

Le treuil utilisé pour cette étude a été décrit par Silva (1996). Celui-ci consiste en un treuil mécanique portatif radio-tir 740<sup>TM</sup> (figure 10). Ce treuil est muni d'un traîneau et se transporte aisément en remorque, même en terrain difficile. Son moteur deux temps  $JLO^{\text{TM}}$  peut développer jusqu'à 6 chevaux vapeurs, ce qui correspond à une force de traction de 800 kg.

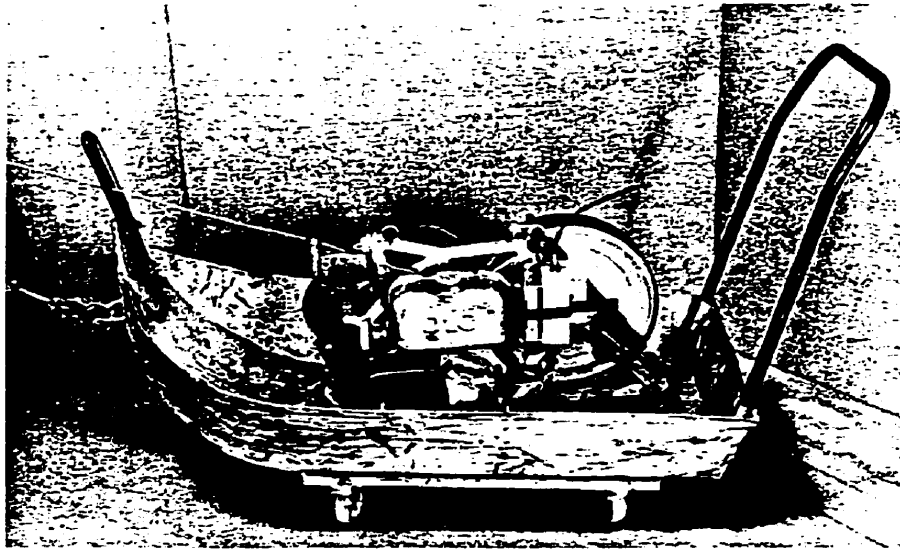


Figure 10: Treuil utilisé lors des essais de treuillage

Le système d'embrayage du treuil est centrifuge et fonctionne uniquement lorsque les gaz sont actionnés. Même si le gaz peut être actionné à distance au moyen d'un émetteur, le fait d'avoir modifié la vitesse d'enroulement par l'addition d'un nouvel engrenage ne permet pas d'utiliser cette fonction.

#### 3.2.5.2) La cellule de charge

La description de la cellule de charge qui suit est tirée de Silva (1996). Cette cellule de charge est un modèle *S-Beam 60001*<sup>TM</sup> d'une capacité de 10 000 livres (figure 11).

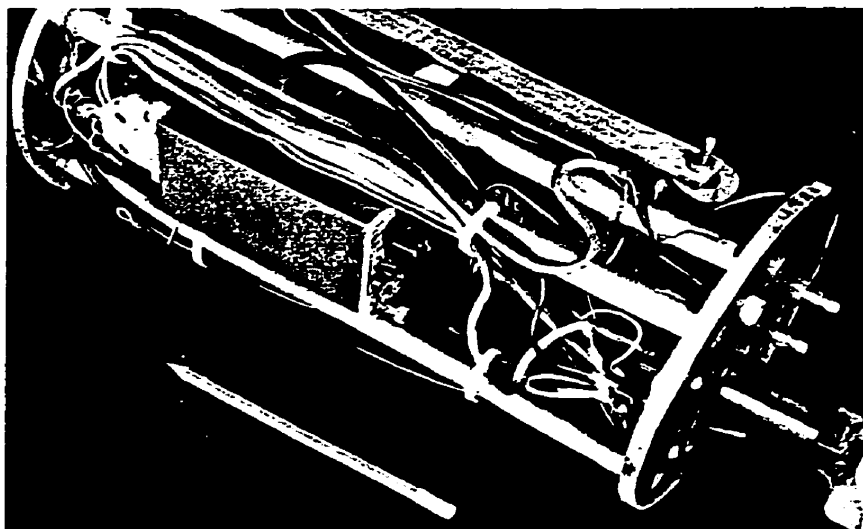


Figure 11: Structure de la cellule de charge (*S-Beam 60001*)

La cellule de charge est ancrée au treuil, tel qu'illustré à la figure 12, dans une boîte résistante aux chocs. Ce boîtier contient aussi le système de conditionnement et d'amplification du signal de la cellule de charge, de même que les batteries alimentant tout le système. Le signal, à sa sortie de la cellule de charge, passe par le système de conditionnement et d'amplification, pour être ensuite acheminé vers l'acquisiteur de données.

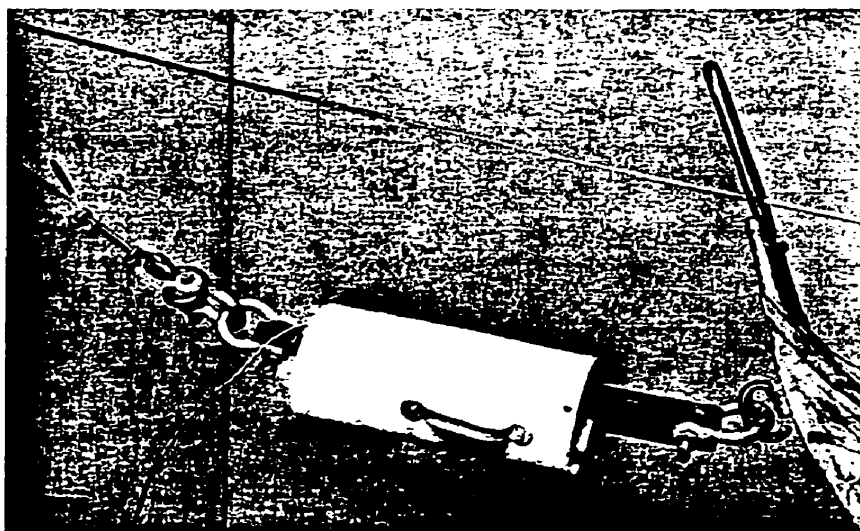


Figure 12: Système d'attache entre la cellule de charge et le treuil

### 3.2.5.3) L'acquisiteur de données

Afin de lire et d'enregistrer les données en provenance de la cellule de charge, un appareil d'acquisition de données *Data logger L840™* a été utilisé (figure 13). Celui-ci était programmé pour enregistrer une donnée toutes les 0,5 seconde. Les données ont ainsi été enregistrées sur des cartes d'acquisition de données et ensuite transférées dans un micro-ordinateur portable compatible *IBM®* à l'aide du programme *Unipulse™*, programme fourni avec le *Data logger™*. Ce programme a été conçu pour permettre la récupération des données de la carte d'acquisition et leur transformation en format «.prn» compatible avec le logiciel *Microsoft® Excel* (Silva 1996).

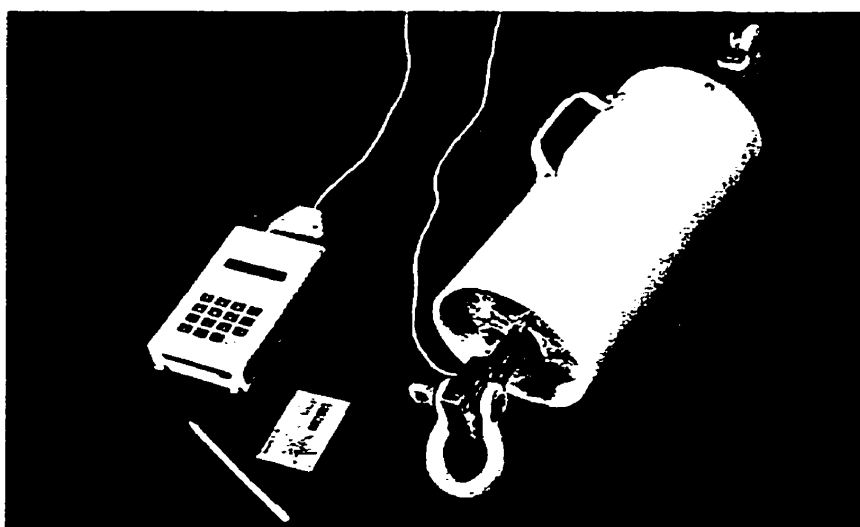


Figure 13: *Data logger L840™* avec carte d'acquisition et cellule de charge

### 3.2.5.4) La caméra

Une caméra a été utilisée pour filmer le déplacement de la tige lors du treuillage afin de permettre la mesure des déplacements du point d'attache entre le câble et l'arbre (B), du centre de gravité de l'arbre (C) ainsi que d'un éventuel point de rupture (A). La caméra utilisée était une *JVC™ GX-N80UT* avec chronomètre intégré. Ce dernier était nécessaire pour permettre de synchroniser l'enregistrement des forces et des images, ce qui permet par la suite de retrouver l'image correspondant à la force maximale enregistrée par la cellule de charge. Un clavier incorporé à la caméra permettait également d'inscrire le numéro du test et la date de la



prise de donnée pour éviter toute confusion. La caméra était reliée à un magnétoscope à cassette *HR-S10U* par un adaptateur *TU-S10U* et le tout était alimenté par une batterie.

### 3.2.5.5) L'étalon de référence

Un étalon de référence, constitué de tubes de PVC formant un carré de 2,075 m de côté, a été utilisé en vue du redressement des images enregistrées par la caméra vidéo. Afin d'améliorer la visibilité des coins du carré, un disque de bois de couleur vive y a été apposé. Le centre de ces disques a par la suite servi de point d'appui pour le redressement des images.

### 3.2.6) Prise des données terrain

Le treuillage s'est déroulé au cours des mois de juillet et août de l'année 1996.

#### 3.2.6.1) Préparation des sites

Pour préparer le site, il a d'abord fallu établir un sentier d'accès servant au déplacement du treuil ainsi qu'au transport du matériel. Ce sentier sommaire a été aménagé à l'aide d'une tronçonneuse. Le dégagement de l'aire de treuillage a été ensuite effectué afin d'assurer la libre chute des arbres treuillés et représentait un cône permettant à l'arbre d'être treuillé sans entrer en contact avec un obstacle, tel qu'illustré à la figure 14.

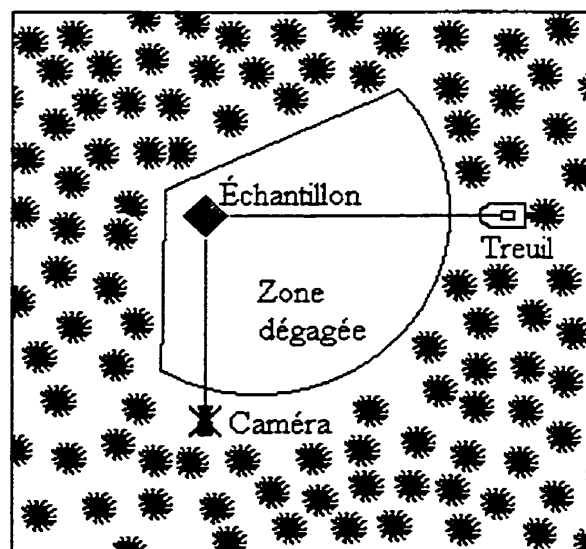


Figure 14: Vue en plongée d'un site de treuillage

Une fois le dégagement de l'arbre échantillon terminé, la caméra a pu être installée en prévision de la prise de données.

### 3.2.6.2) Déroulement d'un essai

Le déroulement des essais s'effectuait à raison de deux à trois treuillages d'échantillons par jour. Le treuil, qui devait être ancré solidement à la base d'un arbre, constituait l'élément principal à positionner, car de lui dépendait la position des autres appareils de mesures. Une fois le treuil en position, il était alors possible d'évaluer la zone de chute potentielle de l'échantillon et ainsi dégager un corridor suffisamment large pour permettre le bon déroulement de l'expérience. Une fois cette étape complétée, une zone libre permettant l'installation de la caméra vidéo était aménagée. Celle-ci se devait d'être positionnée à 90° par rapport à l'axe formé par l'arbre et le treuil, afin d'enregistrer les images selon le plan de treuillage et de limiter la distorsion. De préférence, cet endroit était situé à l'abri du soleil direct pour éviter les contre-jours.

Durant la mise en place de la caméra, la distance ( $L$ ) et l'inclinaison de la pente ( $\alpha$ ) (en pourcentage) entre l'arbre et le treuil, ainsi que la distance et l'inclinaison de la pente entre l'arbre et la caméra ont été mesurées. Par la suite, le diamètre à hauteur de poitrine ( $DHP$ ) ainsi que le diamètre à la souche ( $DHS$ ) de l'arbre échantillon ont été mesurés à l'aide d'un ruban diamétrique. La hauteur de l'arbre a également été mesurée à l'aide d'un clinomètre.

La sangle servant à attacher la poulie reliant l'arbre au treuil a été installée à mi-hauteur de la tige (point  $B$ ). Pour suivre la position du point  $B$  tout au long du treuillage, une cible d'aluminium a été fixée au-dessus de la sangle de la poulie.

Une fois la caméra en place, le numéro et la date du test ont été enregistrés sur la bande vidéo à l'aide du clavier intégré à la caméra. La cellule de charge reliée à l'enregistreur de données a permis de prendre en note la valeur de la lecture initiale de la cellule de charge (en lbs), qui correspond à la tension à l'intérieur de l'appareil. La position de l'arbre avant treuillage a été filmée, en prenant soin de bien placer dans l'axe de treuillage l'étalon de référence devant

servir au redressement de l'image. Les enregistrements des images et des données ont été synchronisés, puis vérifiés, car un mauvais synchronisme aurait amené la perte de l'échantillon en raison d'une erreur d'enregistrement. Une fois ces étapes complétées, les gaz du treuil ont été actionnés.

À la suite du renversement ou du bris de la tige, les gaz ainsi que l'enregistrement des images et des données ont été arrêtés. La hauteur totale de l'arbre ( $H_{tot}$ ), la hauteur du point d'attache de la sangle ( $y_B$ ) ainsi que la hauteur de la cime vivante de l'arbre ont alors été notées. Pour les tiges renversées, le complexe sol-racine a été décrit selon un plan tridimensionnel à partir de la souche. Pour les tiges brisées, la hauteur du point de rupture ( $y_A$ ) et le diamètre de la tige au point de rupture, ainsi que le diamètre du tronc à 2, 4 et 6 m à partir de la souche ont été notés. Deux branches perpendiculaires, situées à la base de chaque section de cime, ont été mesurées afin de déterminer le volume du feuillage.

Des échantillons de racines brisées ont été récoltés sur les tiges renversées. Pour les tiges brisées, une section du tronc a été prélevée au niveau du point de rupture. Ces échantillons ont été congelés et expédiés au laboratoire de pathologie forestière du Centre de Foresterie des Laurentides, du Service Canadien des Forêts, dans le but de déterminer s'il y avait présence de pathogènes pouvant affecter la résistance mécanique des tiges.

Pour tous les échantillons, l'âge de la tige a été déterminé à l'aide d'une rondelle de bois prélevée à la souche. Cette rondelle visait également à vérifier de façon visuelle la présence ou non de carie.

Les tiges treuillées ont été tronçonnées en billes de 2,54 m (dimension commerciale) ou moins jusqu'au début de la cime vivante, dans le but de calculer le poids de la cime indépendamment du poids total de l'arbre. La cime a aussi été séparée en sections de 2,54 m, jusqu'au fin bout, et les billots ont été ébranchés pour déterminer séparément le poids du tronc et des branches de chaque section de cime. Lors de la pesée, les branches étaient placées dans une toile, puis suspendues à la cellule de charge, alors que les billes étaient suspendues par leur centre de gravité à l'aide d'un crochet à cette même cellule de charge, tel qu'illustré par la figure 15:

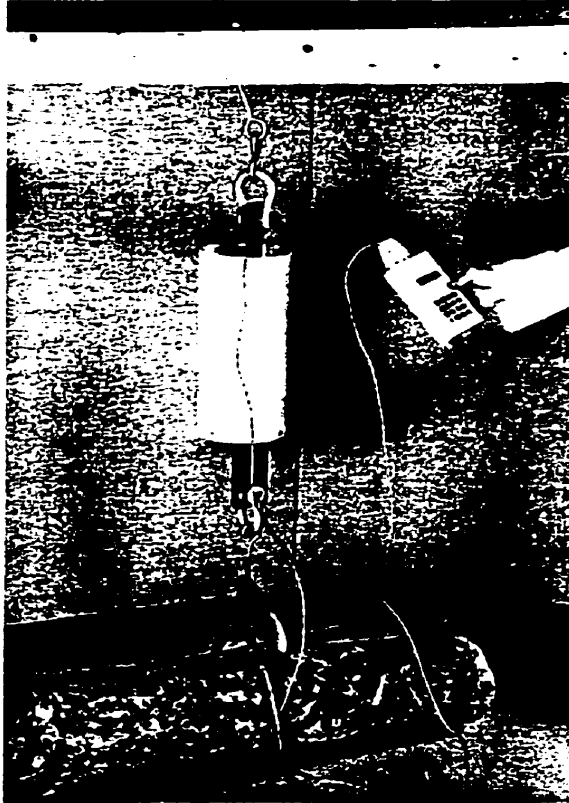


Figure 15: Système de pesée illustrant la pesée d'une bille

### 3.2.7) Prise de données en laboratoire

#### 3.2.7.1) Calcul du centre de gravité des tiges

En connaissant le poids de chaque section, il a été possible de calculer la hauteur du centre de gravité de l'arbre ( $y_C$ ) au-dessus du point de rupture (A) en tenant compte du poids et de la coordonnée (distance en mètres) du centre de chaque bille par rapport au point de rupture, à l'aide de la formule suivante:

$$y_C = (\sum Lect. cor. \times Coord.) / \sum Lect. cor. \quad [12]$$

$y_C$  : Hauteur du centre de gravité de l'arbre (m)

*Lect. cor.* : Poids de la bille (mV)

*Coord.* : Position du centre de gravité de la bille (m)

### 3.2.7.2) Échantillon de bois

Les échantillons de bois récoltés ont été examinés et ceux montrant de la coloration ou de la carie du bois ont été retenus pour isolation. Les isolations ont été réalisées sur milieu BSMA (Worrall 1991). Pour chaque échantillon, 10 à 15 copeaux (1 x 2 mm) de bois ont été prélevés de façon aseptique et déposés sur le milieu de culture. *Stereum sanguinolentum* [(Albertini & Schwein.:Fr) Pouzar], agent de carie rouge très important chez le sapin, était principalement recherché.

### 3.2.7.3) Saisie vidéo

Afin de tenir compte du moment de force induit par le déplacement de la cime de l'arbre, tous les arbres treuillés ont été filmés pour analyser le déplacement de la cime. Les images ainsi saisies ont alors pu être sauvegardées en format «TIFF», format traité par le logiciel de redressement d'image. Le matériel utilisé lors de la saisie des images comprenait un vidéo à quatre têtes de marque *Toshiba*<sup>TM</sup>, une carte vidéo *ATI*<sup>®</sup> *All-in-Wonder*<sup>TM</sup> permettant la saisie d'images, ainsi qu'un ordinateur compatible *Pentium*<sup>TM</sup> d'au moins 100 MHz de puissance. Pour être analysable, chaque échantillon demandait la saisie de deux images, soit l'image avant treuillage (avec l'étalon de référence), ainsi que l'image correspondant au moment où la cellule de charge a enregistré la plus forte tension dans le câble.

Le moment où la force était maximale à l'intérieur du câble a été déterminé à l'aide du graphique de la force enregistrée par rapport au temps écoulé depuis le début de l'essai (Figure 16). Il était alors possible d'identifier rapidement le moment précis correspondant à la tension maximale enregistrée par la cellule de charge; pour le graphique ci-dessous, la force maximale enregistrée était de 353 livres, à 17 secondes du début de l'enregistrement.

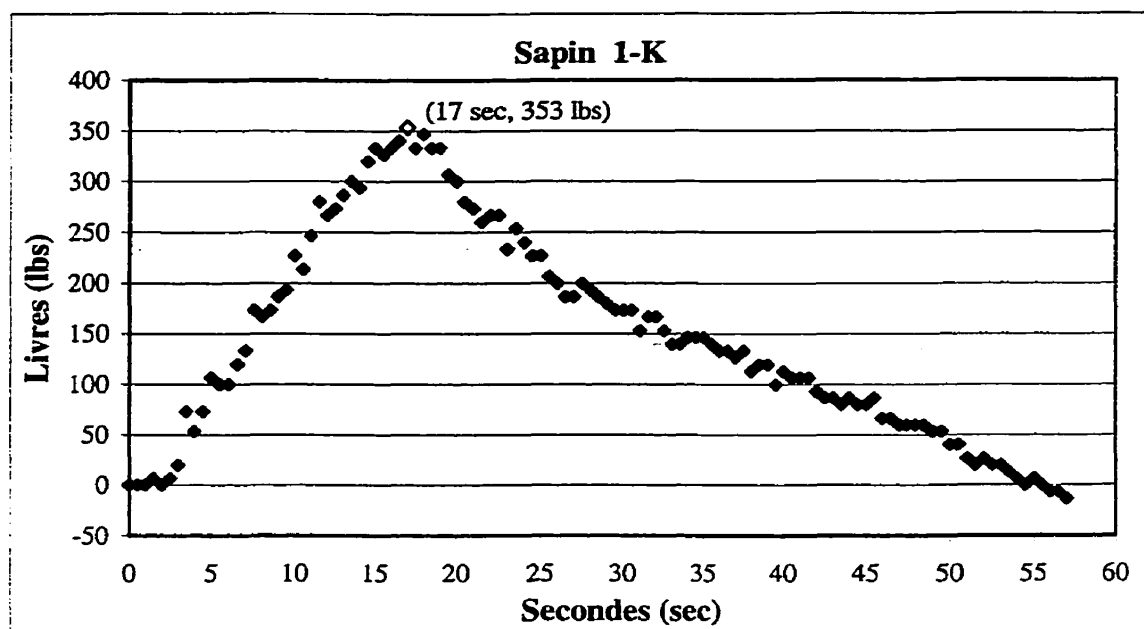


Figure 16: Graphique de la force enregistrée en fonction du temps écoulé.

La saisie d'images a été réalisée à l'aide de l'option «Saisie d'images fixes», du mode *TUNER* du logiciel *ATI® Video Player™* version 3.11. Les paramètres de configuration de l'enregistrement de l'image étaient alors les suivants:

1. Format TIFF (extension .TIF)
2. Écran en mode 256 couleurs.
3. Résolution de l'écran de 640 x 480 pixels.
4. Dimensions de l'image de 1024 par 768 (789 Ko).

L'ajustement des différents paramètres de l'image, tels la couleur, la nuance, la luminance et le contraste ont permis d'améliorer la qualité de l'image, qui a par la suite été traitée à l'aide du logiciel *DVR2™ (Digital Video Rectifier 2 Dimensions)*.

#### 3.2.7.4) Redressement d'image

Lorsque vient le temps d'analyser des images afin d'en tirer de l'information, il importe que les mesures réalisées correspondent à la réalité rencontrée sur le terrain. De façon générale, les effets du relief ou de l'inclinaison de la caméra empêchent la prise directe de mesures précises sur les images. Cette correction de l'effet dû à l'inclinaison de la photographie s'appelle le

redressement et se fait normalement sur des photographies aériennes verticales ou obliques ou sur des photographies terrestres (Côté 1993). Le redressement produit alors une image dont l'échelle est constante, ce qui permet le prélèvement direct d'information quantitative ou la cartographie (Côté 1993). Il est alors possible de mesurer directement sur la photographie redressée des coordonnées et des distances.

Pour cette étude, le redressement d'images était nécessaire en raison de la distorsion engendrée par l'angle de la prise de données. En effet, bien que la caméra ait été positionnée à 90° par rapport au plan de treuillage, l'inclinaison du terrain ainsi que la hauteur de l'arbre ont pu être une cause majeure de distorsion. De plus, comme il existait sur le terrain des différences entre les élévations de la caméra et de l'arbre échantillon ainsi que dans l'inclinaison de la caméra lors de la prise de vue, un redressement d'image s'imposait.

Les étapes d'un redressement numérique sont, de façon générale, les suivantes (Côté 1993):

1. Acquisition des données.
2. Indication sur l'image originale des points d'appuis connus (position photo et terrain).
3. Sélection de la zone de l'image à redresser.
4. Choix d'une échelle et d'un angle de rotation pour la future image redressée.
5. Redressement de l'image.
6. Prise de coordonnées et mesure de distances sur l'image redressée.

La première étape, l'acquisition des données, doit comprendre la cueillette des données ainsi que leur transformation en format numérique. La cueillette de données a été réalisée lors de l'enregistrement vidéo des essais de treuillage et la saisie vidéo a permis de transformer l'image analogique en format numérique. Le signal analogique de la bande vidéo a été converti en une matrice de pixels, où chaque pixel correspondait alors à un échantillonnage du signal-image analogique et contenait une valeur numérique représentant l'intensité lumineuse locale (Côté 1993). L'image ainsi numérisée a pu être redressée à l'aide du logiciel *DVR2™*, qui a été développé par le Centre de Recherche en Géomatique de l'Université Laval. Le *DVR2™* est un logiciel de redressement d'images qui permet, entre autres, la prise des coordonnées d'un point sur l'image correspondant à une mesure sur le terrain (Côté 1993).

La seconde étape du redressement numérique consiste en une saisie à l'écran de points d'appui dont la position sur le terrain est connue. Chaque point d'appui, possède alors ses coordonnées qui doivent être entrées manuellement dans le logiciel. Il est important que les points d'appui soient bien distribués dans l'image, afin d'éviter l'extrapolation lors du redressement. Dans le cadre de l'étude de treillage et tel qu'illustré à la figure 17, un étalon carré de 2,075 m de côté a été utilisé afin que chacun de ses coins serve de point d'appui pour le redressement. Comme il n'était pas possible de conserver l'étalon dans le plan de treillage tout au long de l'expérience, les coordonnées image (en pixels) de chaque coin de l'étalon ont dû être notées, afin de les repositionner sur l'image de l'arbre durant le treillage, tel qu'illustré par la figure 18. Ces points, dont les coordonnées terrain étaient connues, servaient de référence pour les calculs de redressement. Un minimum de quatre points d'appui a été requis afin de générer les équations de redressement.

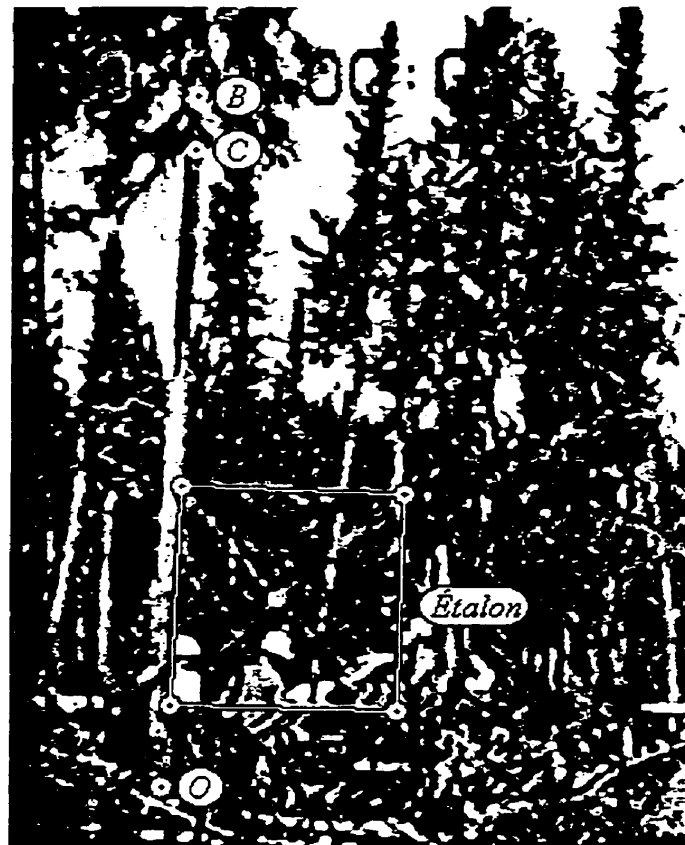


Figure 17: Position de l'étalon et des points servant au redressement de l'image



Lors de l'ouverture de chaque image, le programme *DVR2™* positionne un système d'axes dont l'origine se situe au coin supérieur gauche de l'image. Sur ce système d'axes, l'axe des *X* croît vers la droite alors que celui des *Y* croît vers le bas. Les coordonnées sont en pixels. Comme la caméra est stable sur son trépied, la position du coin supérieur gauche est la même pour les deux images. Il est alors possible de replacer l'étalon, par le biais de ses coordonnées image, sur l'image de l'arbre treuillé et ainsi d'obtenir les points d'appui nécessaires au redressement. Dans les cas où la caméra s'était déplacée par accident, les coordonnées image ont été ajustées en fonction du déplacement.

La troisième étape du redressement consistait à sélectionner la zone à redresser. Comme une image contient souvent plus d'informations que ce que l'utilisateur désire traiter, l'option de sélection de la zone à redresser est importante pour réduire au minimum le temps de calcul tout en permettant une réduction la taille de l'image produite (Côté 1993). Le programme *DVR2™* permet de positionner les quatre coins de la zone désirée et encore une fois, il est nécessaire de noter la position des coins, afin de redresser la même portion sur les deux images. Le coin supérieur gauche de la zone à redresser devient alors l'origine d'un nouveau système d'axes. Ce point d'origine doit être le même pour les deux images, afin de conserver le même plan de référence et ainsi relever la position des différents points sur les deux images.

Le système redresse ensuite la zone choisie et passe automatiquement au module de visionnement qui affiche l'image redressée. Il est alors possible d'obtenir les coordonnées exactes de chaque point visible sur l'image redressée. L'option de mesure de distance détermine la distance planimétrique, exprimée en unité terrain, entre deux points choisis et visibles sur l'image redressée. Un marqueur rouge indique la position de chacun des deux points et une ligne de couleur verte relie les points entre eux (Côté 1993).

L'analyse des images a été réalisée en deux étapes. À chaque arbre échantillon étaient associées deux images, soit celle avant treuillage avec l'étalon (image A), telle qu'illustrée à la figure 17, et celle durant le treuillage, où la force mesurée par la cellule de charge était maximale (image T), telle qu'illustrée à la figure 18. Chaque image a été redressée en utilisant les points d'appui déterminés par les coins de l'étalon.



Figure 18: Image T avec l'étalon repositionné

Les données recueillies sur l'image A avant le redressement, en coordonnées pixels, étaient les suivantes:

1. la position des points d'appuis;
2. la position des coins de la zone à redresser.

Les données recueillies sur l'image A redressée, en pixels et en mètres, étaient:

3. la position du point d'attache ( $B$ );
4. la position du centre de gravité ( $C$ );
5. la position du point de rupture ( $A$ );
6. la position de la base de l'arbre ( $O$ ).

En ce qui concerne les coordonnées et les distances récoltées sur l'image T, elles étaient en pixels et en mètres, et n'étaient récoltées que sur l'image redressée. Ces informations étaient:

1. la position du point d'attache ( $B'$ );
2. la position du centre de gravité ( $C'$ );

3. la position du point de rupture ( $A'$ );
4. la distance entre  $B$  et  $B'$  ( $BB'$ );
5. la distance entre  $C$  et  $C'$  ( $CC'$ );
6. la distance entre  $A$  et  $A'$  ( $AA'$ ).

La figure 19 illustre la position des différents points ainsi que les mesures de distance ( $BB'$  et  $CC'$ ) qui ont été réalisées sur les images.

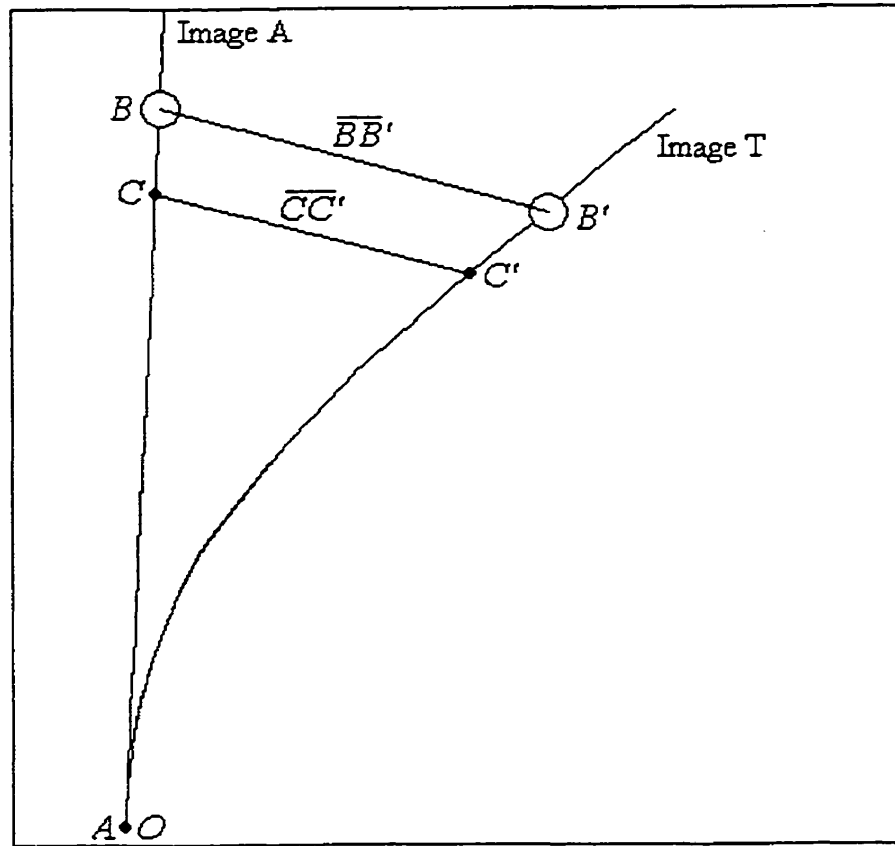


Figure 19: Localisation des points et mesures des distances sur les images A et T

Comme il est possible de le constater à la figure 19, les positions du point d'attache ( $B$  et  $B'$ ) sont les seuls points identifiables sur l'image redressée, en raison de la cible qui y était attachée. La distance entre le point  $O$  et le point  $B$  ainsi que la distance entre  $O$  et le centre de gravité ( $C$ ) étant connues, il a alors été possible de déterminer les coordonnées des points  $O$ ,  $C$  et  $C'$ . Par la suite, la hauteur du point  $C$  a été obtenue grâce à la formule suivante:

$$H_{CDG} = (\sum w_i * h_i) / W \quad [13]$$

$H_{CDG}$  : Hauteur du centre de gravité (m)

$w_i$  : Poids de la section  $i$  de l'échantillon, tel qu'indiqué par la cellule de charge (Volts)

$h_i$  : Hauteur du centre de gravité de la section  $i$  de l'échantillon (m)

$W$  : Poids total (Volts)

La distance séparant les points  $B$  et  $C$  ( $BC$ ) était calculée en soustrayant la hauteur du point  $C$  de la hauteur du point  $B$ . Il était alors possible de calculer les coordonnées exactes des points  $C$  ou  $C'$  tel que présenté à la figure T. Comme les premières coordonnées disponibles sur l'image n'étaient que des coordonnées pixel, il n'était pas possible de localiser directement les points  $C$  et  $C'$  à partir de la distance  $BC$  (m) et des coordonnées pixel du point  $B$ . Pour trouver la position en  $Y$  de  $C$  ( $Y_C$ ), il était nécessaire d'établir un point  $U$ , situé au centre de la tige, à une distance de  $B$  légèrement supérieure à la distance  $BC$ . La distance  $BU$ , ainsi que les coordonnées pixel de  $B$  ( $X_B; Y_B$ ) et de  $U$  ( $X_U; Y_U$ ) étaient alors connues et la position  $Y_C$  était calculée grâce à l'équation 14, tel qu'illustré à la figure 20:

$$Y_C = Y_B - BC (Y_B - Y_U) / BU \quad [14]$$

La position en  $X$  du point  $C$  ( $X_C$ ) était déterminée directement à l'écran en déplaçant le pointeur jusqu'au centre de la tige, en respectant la coordonnée  $Y_C$ .

$$Y_C = Y_B - \overline{BC} (Y_B - Y_U) / \overline{BU}$$

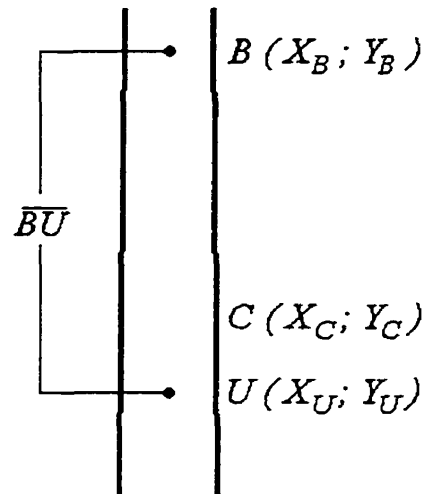


Figure 20: Calcul de la position du point C

Même lorsque le point  $O$  était visible à l'écran ou que des obstacles empêchaient la lecture directe de ses coordonnées, celles-ci étaient obtenues de façon similaire à celles du point  $C$ , soit à l'aide de l'équation 14, utilisée avec l'image  $A$ .

Pour ce qui était des positions du point de rupture (point  $A$  et  $A'$ ), elles étaient les mêmes que pour le point  $O$  lorsque l'arbre déracinait. Lorsque l'arbre cassait, les positions des points  $A$  et  $A'$  étaient obtenues à l'aide de l'équation 14.

Toutes les coordonnées terrain étaient utilisées afin de déterminer les différents paramètres nécessaires au calcul du moment de force. (Équations 4, 5, 6, 7, 8 et 11)

### 3.2.8) Analyses statistiques

Trois types d'analyses ont été utilisés pour explorer et définir la relation existant entre le moment critique ( $M_c$ ) et les différentes variables associées à la taille des arbres. Il s'agit d'une analyse de corrélation, de l'analyse graphique et de la régression linéaire simple.

À la lumière des hypothèses posées, les variables étudiées étaient les suivantes:

<u>Variable dépendante <math>Y</math></u>	<u>Variabes indépendantes <math>X</math></u>
Moment critique $M_c$ (kN·m)	Âge réel $\hat{A}ge$ (an) Diamètre à hauteur de souche $DHS$ (cm) mesuré à 0,15 m Diamètre à hauteur de poitrine $DHP$ (m), mesuré à 1,30 m Hauteur totale $H_{tot}$ (m) Hauteur / $DHP$ $H/D$ Hauteur · $DHP^2$ $H \cdot DHP^2$ (m <sup>3</sup> ) Poids de la tige $W_{tige}$ (kN) Poids total $W$ (kN) Volume racinaire $V_{rac}$ (m <sup>3</sup> )

Une analyse de corrélation a été réalisée dans le but de déterminer si les variables indépendantes étaient liées. Il était alors possible de déterminer si la régression linéaire multiple pouvait s'appliquer. Dans le cas où les variables indépendantes seraient corrélées, la régression linéaire simple remplacerait la régression linéaire multiple.

Les analyses graphiques ont été utilisées pour explorer le type de relation existant entre la variable dépendante (moment critique) et les différentes variables indépendantes. Par la suite, la régression linéaire simple a été utilisée pour définir les relations existant entre le moment critique et les différentes variables. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du progiciel SPSS™ version 7.5.1. La régression linéaire simple a été effectuée à l'aide de la méthode Enter du progiciel SPSS™, qui consiste à forcer l'entrée de la variable indépendante dans le modèle (Norusis 1994). Lors de la régression, les résidus ainsi que les valeurs prédites ont été calculés et enregistrés pour analyse ultérieure.

Afin de respecter les postulats intrinsèques à la régression, c'est à dire 1) l'indépendance des erreurs expérimentales, 2) une distribution normale de l'erreur expérimentale et 3) l'homogénéité de la variance des erreurs expérimentales, une analyse des résidus a été effectuée (Norusis 1994; Neter et al 1996). Celle-ci a également permis de détecter les valeurs aberrantes.

### **3.2.9) Comparaison des droites de régression**

Une fois les relations entre le moment critique et les différentes variables indépendantes obtenues, il convient de les comparer afin de déterminer si les deux espèces étudiées se comportaient différemment durant le treuillage. La comparaison des droites de régression obtenues pour les deux espèces a été réalisée à l'aide du test de Chow. Ce test permet de déterminer, entre autres, si les pentes et les ordonnées à l'origine des deux droites sont semblables (Chow 1960). Pour ce, le test utilise les sommes des carrés des résidus des deux équations séparées ainsi que la somme des carrés des résidus de la régression comprenant tous les échantillons.

## **3.3) RÉSULTATS POUR L'ÉPINETTE BLANCHE**

### **3.3.1) Description des échantillons treuillés**

Le treuillage a été réalisé sur 43 épinettes blanches, soit sur trois arbres échantillons de plus que ne le prévoyait initialement la méthodologie. Afin d'augmenter la taille de l'échantillonnage et de ne pas perdre l'investissement réalisé lors de la prise de données, les 3 tiges supplémentaires ont été conservées pour les analyses. Lors des essais de treuillage, quatre épinettes blanches se sont rompues (9,3%), alors que les 39 autres ont été renversées (90,7%). La longueur moyenne de la cime vivante des tiges était de 8,02 m, représentant ainsi 56,4% de la hauteur totale de la tige.

L'âge réel des tiges treuillées variait entre 43 et 111 ans, pour une moyenne de 62,9 (20,6) ans. La moyenne d'âge des épinettes blanches ne reflétait pas le nombre d'années où le peuplement était libre de croître (en moyenne de 50 ans). Ceci peut s'expliquer par le fait que la période d'oppression des tiges n'a été évaluée que sur les sapins baumiers. Les caractéristiques dendrométriques moyennes des tiges d'épinette blanche et de leur système racinaire sont présentées aux tableaux 4 et 5 respectivement.

Tableau 4: Caractéristiques dendrométriques moyennes des tiges d'épinette  
blanche treuillées

Site	DHS (cm)	DHP (cm)	Hauteur (m)	H/D	Poids de la tige (kN)	Poids du feuillage (kN)	Poids total (kN)
1	26,0	20,8	14,3	70,2	1,447	0,498	1,946
2	20,1	16,6	13,6	82,5	1,144	0,346	1,490
3	20,7	16,7	13,8	85,1	1,314	0,410	1,724
4	26,0	21,4	15,5	73,5	1,964	0,548	2,513

Tableau 5: Caractéristiques moyennes des systèmes racinaires des tiges d'épinette  
blanche treuillées et résultats des test de  $t$

Site	Superficie (m <sup>2</sup> )	Profondeur (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
1	3,65 <sup>a</sup>	0,59 <sup>a</sup>	0,79 <sup>a</sup>
2	2,06 <sup>a</sup>	0,45 <sup>ab</sup>	0,35 <sup>ab</sup>
3	2,30 <sup>a</sup>	0,46 <sup>b</sup>	0,35 <sup>ab</sup>
4	2,52 <sup>a</sup>	0,78 <sup>c</sup>	0,66 <sup>ac</sup>

$\alpha = 0,05$

### 3.3.2) Analyses en laboratoire

#### 3.3.2.1) Analyse des échantillons de bois

L'analyse réalisée en laboratoire a permis de déterminer que onze épinettes blanches présentaient des traces de coloration du bois (stade initial précédant la carie). De ces échantillons, deux avaient des racines affectées par *Armillaria* sp. (nos 2-5 et 2-Z), alors qu'un autre (no 2-10) présentait des résinoses typiques de ce même pathogène. Aucun échantillon ne révélait la présence de *Stereum sanguinolentum*.

#### 3.3.2.2) Calcul du centre de gravité

La hauteur du centre de gravité (point C) a été calculée à l'aide de l'équation 9 et les moyennes des résultats, par site, sont présentés au tableau 6.



**Tableau 6: Hauteur moyenne du centre de gravité et du point d'attache des épinettes blanches treuillées**

Site	Hauteur moyenne du centre de gravité (m)	Hauteur moyenne du point d'attache (m)
1	5,60	7,10
2	5,49	6,46
3	5,67	6,48
4	6,15	7,52

À la lumière de l'information présentée au tableau 6, il est possible de déterminer que le centre de gravité était en moyenne situé à 40,4% de la hauteur totale et que le point d'attache du câble, qui devait être ancré à mi-hauteur de la tige, était en moyenne situé à 48% de la hauteur totale.

### 3.3.2.3) Redressement des images et calcul du moment critique ( $M_c$ )

Suite à l'analyse des images du treuillage, il a été possible de déterminer que le centre de gravité des tiges d'épinette blanche s'était déplacé en moyenne de 1,61 m sur l'axe des X et de 0,42 m sur l'axe des Y avant que le moment critique ( $M_c$ ) ne soit atteint. Ce déplacement correspond à un angle moyen  $\angle BOB'$  de 0,290 (0,180) rad (16,619 (10,301)°). À cet angle, le moment total est en moyenne de 16,78 (9,42) kN·m et le moment attribuable au poids de l'arbre au-dessus du point de rupture est en moyenne de 3,18 (2,17) kN·m (20,0 % du moment critique). La durée de treuillage nécessaire pour atteindre le moment critique variait entre 8,5 et 75,5 sec (moyenne de 27 sec). Le tableau 7 présente une description statistique des différentes variables à l'étude pour les épinettes blanches treuillées.

Tableau 7: Statistiques des différentes variables pour l'épinette blanche

Variables	$M_c$ (kN-m)	Âge (an)	DHS (cm)	DHP (cm)	$H_{tot}$ (m)	H/D	$H-DHP^2$ (m <sup>3</sup> )	W (kN)	$W_{tige}$ (kN)	$V_{rac}$ (m <sup>3</sup> )
Moyenne	16,78	62,90	23,02	18,73	14,25	78,20	0,541	1,89	1,45	0,52
Écart type	9,42	20,57	5,25	3,99	1,43	11,15	0,281	0,89	0,69	0,46
Minimum	2,55	43	13,4	11,5	11,8	57,97	0,157	0,58	0,47	0,02
Maximum	38,86	111	38,2	30	17,7	105,91	1,593	5,12	3,96	2,45

### 3.3.3) Analyses statistiques

#### 3.3.3.1) Analyse du bris des tiges

Après l'examen graphique des différentes variables à l'étude liées aux quatre tiges qui s'étaient rompues (numéros 4-6, 4-7, 4-9 et 2-9), tel que présenté à la figure 21, il a été conclu que ces tiges ne se comportaient pas comme des valeurs aberrantes par rapport aux tiges renversées. Elles n'ont donc pas été traitées différemment des autres, en raison du bris de leur tige.

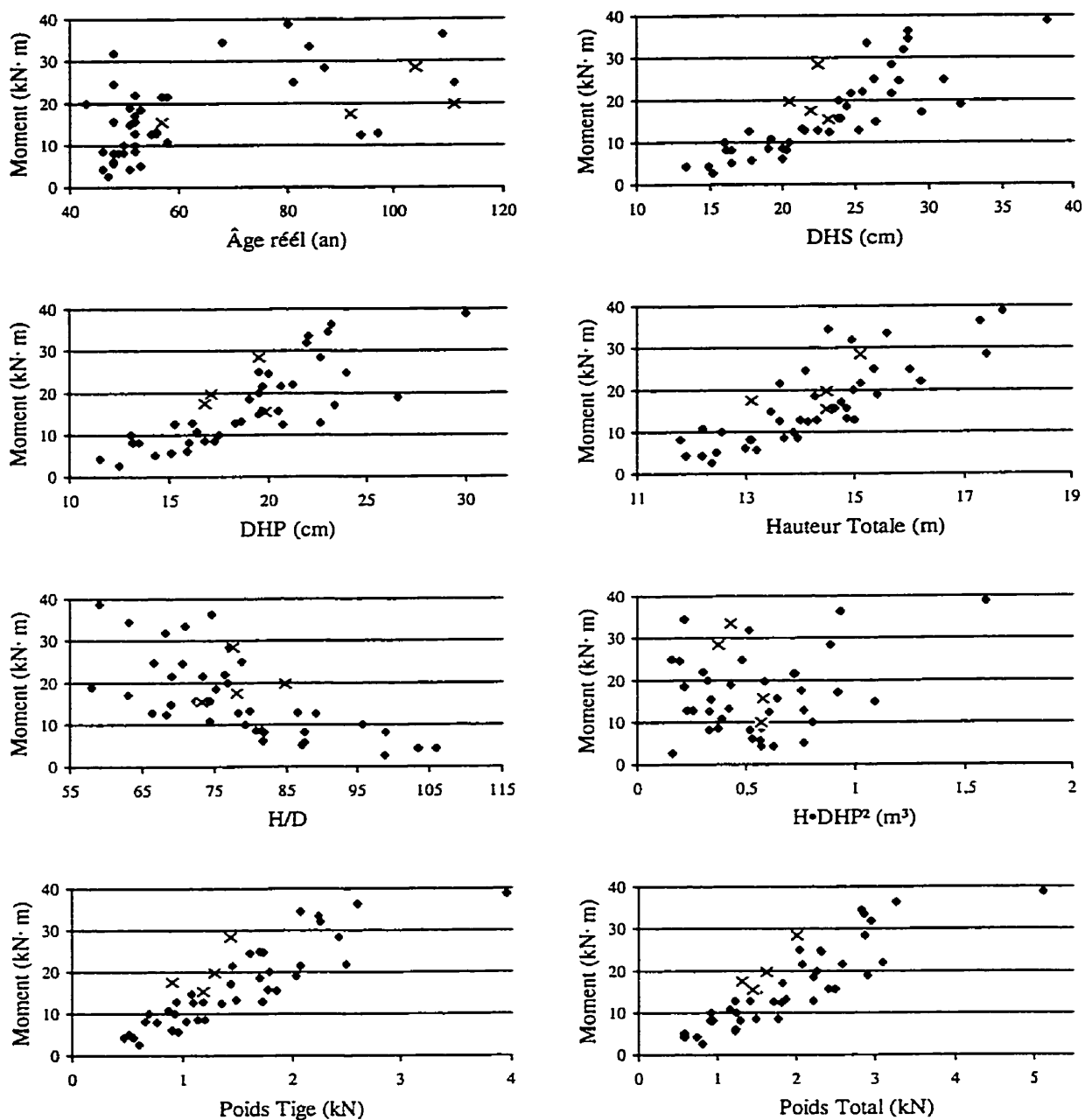


Figure 21: Comportement des tiges rompues (x) et des tiges renversées (♦) pour l'épinette blanche

### 3.3.3.2) Analyse de corrélation

L'analyse de corrélation a permis d'établir qu'il y avait un lien statistiquement significatif entre les différentes variables liées à la taille de l'arbre, tel que présenté au tableau 8. De ce tableau,

il ressort que l'âge ne présente pas une forte relation linéaire avec les autres variables liées à la taille de l'arbre.

Tableau 8: Analyse de corrélation entre les différentes variables liées à la taille de l'arbre chez l'épinette blanche (n = 43 et n = 38 pour  $V_{rac}$ )

Var.	Âge (ans)	DHS (cm)	DHP (cm)	H <sub>tot</sub> (m)	H/D	H·DHP <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> )	W <sub>tige</sub> (kN)	W (kN)	V <sub>rac</sub> (m <sup>3</sup> )
Âge	1,000	0,368*	0,420**	0,519**	-0,306*	0,433**	0,362*	0,348*	0,471**
DHS	0,368*	1,000	<b>0,968**</b>	<b>0,828**</b>	<b>-0,890**</b>	<b>0,943**</b>	<b>0,868**</b>	<b>0,881**</b>	0,544**
DHP	0,420**	<b>0,968**</b>	1,000	0,867**	<b>-0,915**</b>	<b>0,972**</b>	<b>0,882**</b>	<b>0,895**</b>	0,528**
H <sub>tot</sub>	0,519**	<b>0,828**</b>	<b>0,867**</b>	1,000	-0,645**	<b>0,887**</b>	<b>0,908**</b>	<b>0,880**</b>	0,476**
H/D	-0,306*	<b>-0,890**</b>	<b>-0,915**</b>	-0,645**	1,000	<b>-0,810**</b>	-0,691**	<b>-0,727**</b>	-0,496**
H·DHP <sup>2</sup>	0,433**	<b>0,943**</b>	<b>0,972**</b>	<b>0,887**</b>	<b>-0,810**</b>	1,000	<b>0,918**</b>	<b>0,922**</b>	0,481**
W <sub>tige</sub>	0,362*	<b>0,868**</b>	<b>0,882**</b>	<b>0,908**</b>	-0,691**	<b>0,918**</b>	1,000	<b>0,990**</b>	0,374*
W	0,348*	<b>0,881**</b>	<b>0,895**</b>	<b>0,880**</b>	<b>-0,727**</b>	<b>0,922**</b>	<b>0,990**</b>	1,000	0,396*
V <sub>rac</sub>	0,471**	0,544**	0,528**	0,476**	-0,496**	0,481**	0,374*	0,396*	1,000

\* Corrélation significative au seuil  $\alpha = 0,05$

\*\* Corrélation significative au seuil  $\alpha = 0,01$

Les coefficients de corrélation en gras présentent de fortes relations linéaires ( $R > 0,7$ )

### 3.3.3.3) Analyse graphique

Afin d'explorer le type de relation existant entre le moment critique ( $M_c$ ) et les variables indépendantes, un graphique du moment critique en fonction de chaque variable indépendante a été réalisé.

Les résultats de l'analyse graphique démontrent de faibles relations linéaires entre le moment critique et l'âge réel (figure 21) de même qu'entre le moment critique et le volume racinaire (figure 22) et de fortes relations linéaires entre le moment critique et les autres variables indépendantes (figure 21).

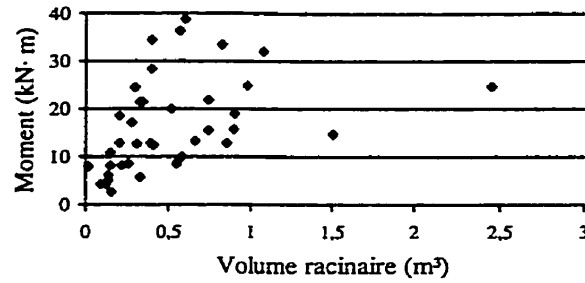


Figure 22: Faible relation linéaire entre le moment critique et le volume racinaire chez l'épinette blanche

#### 3.3.3.4) Analyse des résidus

Les résultats de l'analyse des résidus sont semblables pour l'épinette blanche et le sapin baumier. Ils démontrent que les postulats de l'indépendance des erreurs expérimentales et de la distribution normale de l'erreur expérimentale étaient respectés. Pour ce qui est du postulat de l'homogénéité de la variance des erreurs expérimentales, dans certains cas ( $DHP$ ,  $DHS$ ,  $H/D$  et  $H \cdot DHP^2$ ), il n'était pas respecté. Pour corriger cette situation, la transformation de la variable dépendante et de la variable indépendante par la fonction logarithme naturel, s'est avérée efficace (Sokal et Rohlf 1981; Zar 1984). Cette fonction a été appliquée, pour l'épinette blanche et le sapin baumier, à la variable dépendante et à la variable indépendante pour les régressions impliquant les variables suivantes:  $DHP$ ,  $DHS$ ,  $H/D$  et  $H \cdot DHP^2$ , tel que décrit au tableau 9.

Tableau 9: Transformation des variables pour contrer l'hétérogénéité de la variance des erreurs expérimentales pour l'épinette blanche et le sapin baumier

Variable	Transformation
$M_c$	$\ln x$
$DHP$	$\ln x$
$DHS$	$\ln x$
$H/D$	$\ln x$
$H \cdot DHP^2$	$\ln x$

### 3.3.3.5) Régression linéaire simple

Toutes les régressions linéaires réalisées entre le moment critique ( $M_c$ ) et les différentes variables indépendantes (Poids total ( $W$ ), poids de la tige ( $W_{tige}$ ), hauteur totale ( $H_{tot}$ ), volume racinaire ( $V_{rac}$ ), logarithme naturel du DHP ( $\ln DHP$ ), logarithme naturel du DHS ( $\ln DHS$ ), logarithme naturel du produit de la hauteur totale par le carré du DHP ( $\ln(H \cdot DHP^2)$ ) et logarithme naturel du défilement ( $\ln(H/D)$ )) ont présenté des relations linéaires statistiquement significatives dont la forme est:  $y = \beta_0 + \beta_1 x$ . L'ordonnée à l'origine ( $\beta_0$ ), la pente ( $\beta_1$ ), le coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ), le coefficient de détermination ( $R^2$ ) ainsi que le coefficient de détermination ajusté ( $R^2a$ ) sont présentés au tableau 10.

Tableau 10: Caractéristiques des régressions impliquant le moment critique ( $M_c$ ) et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche

Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$r$	$R^2$	$R^2a$
Âge (an)	1,417	0,244**	0,533	0,284	0,267
$W$ (kN)	-0,473	9,110**	0,861	0,741	0,735
$W_{tige}$ (kN)	-0,134	11,671**	0,859	0,739	0,732
$H_{tot}$ (m)	-60,066**	5,393**	0,816	0,666	0,658
$V_{rac}$ (m <sup>3</sup> )	12,038**	8,740**	0,410	0,168	0,145
$\ln DHP$	-4,555**	2,476**	0,843	0,712	0,705
$\ln DHS$	-4,768**	2,383**	0,861	0,741	0,735
$\ln(H \cdot DHP^2)$	3,419**	1,042**	0,855	0,731	0,724
$\ln(H/D)$	18,489**	-3,508**	0,736	0,542	0,531

\*\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,01$

À la lumière des observations faites au tableau 10 et compte tenu du fait que le coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ) présente une mesure de l'étroitesse de la relation linéaire existant entre les deux variable (Snedecor et Cochran 1971; Norušis 1994), les régressions linéaires simples entre le moment critique et l'Âge ( $r = 0,533$ ) et entre le moment critique et le volume du système racinaire ( $V_{rac}$ ) ( $r = 0,410$ ) ne présentent pas une forte relation linéaire. Pour les autres variables, la valeur de  $r$  varie entre 0,736 et 0,861, ce qui indique de fortes relations linéaires.

Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) indique l'étroitesse de la relation linéaire entre le modèle mathématique obtenu et l'échantillon analysé (Snedecor et Cochran 1971; Norušis 1994). Dans cette étude, les valeurs de  $R^2$  obtenues pour l'épinette blanche varient entre 0,168 et 0,741, ce qui indique que la régression des différentes variables indépendantes expliquait entre 16,8 et 74,1% de la variance du moment critique.

Le coefficient de détermination ajusté ( $R^2a$ ) corrige le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et révèle comment l'équation obtenue par la régression linéaire s'ajuste à la population d'où les échantillons ont été tirés (Norušis 1994). Les valeurs de  $R^2a$  obtenues, suite à l'exclusion de l'Âge et du volume du système racinaire, variaient de 0,531 à 0,735, ce qui indique que les différentes régressions s'ajustaient bien à la population d'épinettes blanches. Les figures 23, 24, 25 et 26 présentent les relations linéaires les mieux ajustées au moment critique.

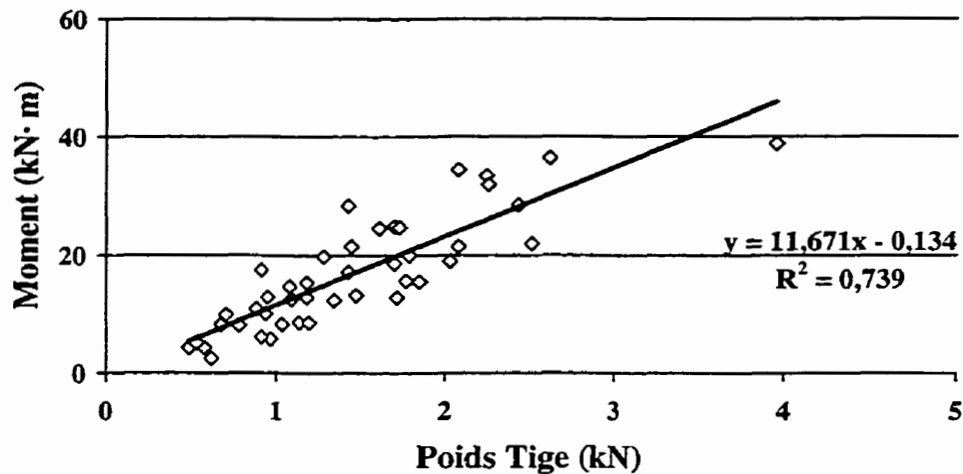


Figure 23: Moment critique en fonction du poids total pour l'épinette blanche

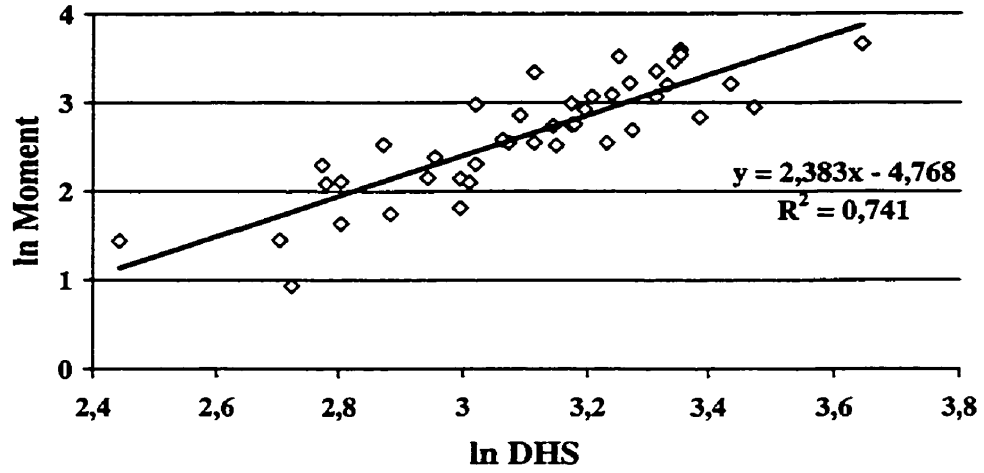


Figure 24: Logarithme naturel du moment critique en fonction du logarithme naturel du *DHS* pour l'épinette blanche

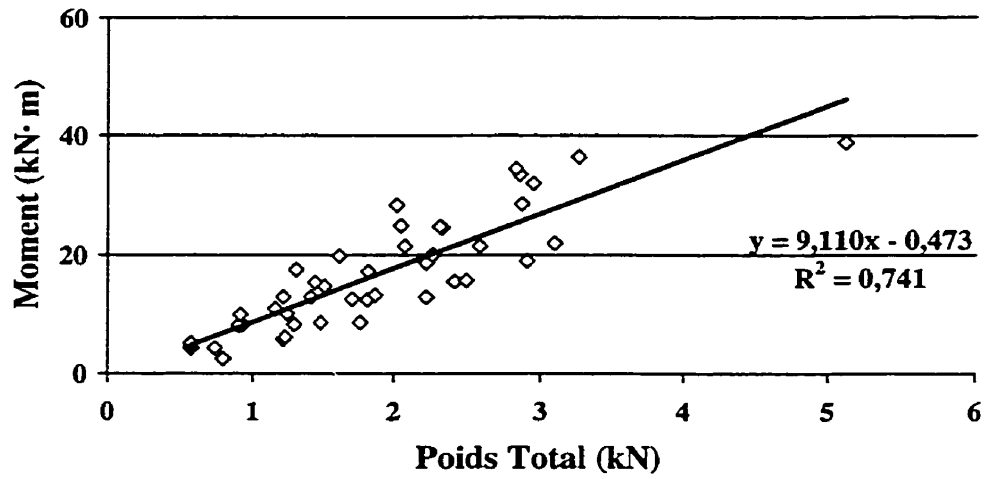


Figure 25: Moment critique en fonction du poids total pour l'épinette blanche



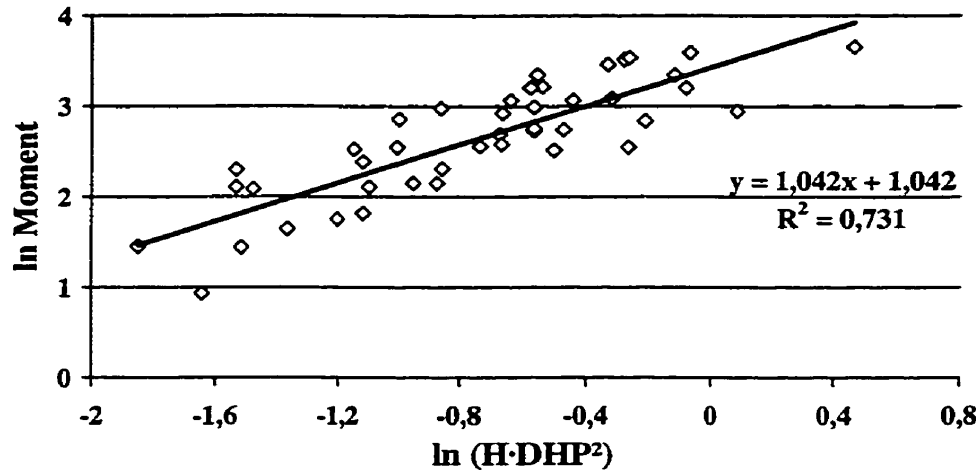


Figure 26: Logarithme naturel du moment critique en fonction du logarithme naturel de  $H \cdot DHP^2$  pour l'épinette blanche

### 3.4) RÉSULTATS POUR LE SAPIN BAUMIER

#### 3.4.1) Description des échantillons et du treuillage

Le treuillage a été réalisé sur 41 sapins baumiers, soit sur un arbre échantillon de plus que ne le prévoyait initialement la méthodologie. Comme pour l'épinette blanche, la tige supplémentaire a été conservée pour les analyses, afin d'augmenter la taille de l'échantillonnage et de ne pas perdre l'investissement réalisé lors de la prise de données. Durant les essais de treuillage, deux sapins baumiers se sont rompus (4,9%) alors que les 39 autres ont été renversés (95,1%). La longueur moyenne de la cime vivante des sapins baumiers était de 8,03 m, soit 55,1% de la hauteur totale de la tige.

L'âge réel des tiges de sapin baumier treuillées variait entre 40 et 103 ans, avec une moyenne de 61 (18,2) ans. Cette moyenne d'âge ne reflète toutefois pas le nombre d'années où le peuplement était libre de croître (en moyenne de 50 ans), puisque lors des coupes précédentes, les petites tiges étaient laissées sur pied, ce qui a amené une grande variabilité dans l'âge réel des tiges. En effet, durant les années 1940 à 1944, la compagnie Anglo Canadian Pulp and Paper Mills Limited a effectué d'importantes coupes forestières dans le secteur visé par la présente étude (Côte 1966) et à cette époque, la coupe et le transport du bois se faisaient de

façon rudimentaire; la hache, la sciote et le cheval étaient alors d'usage courant (Côte 1966; Vézina et Paillé 1969). Les seuls traitements sylvicoles appliqués étaient la coupe à blanc et la coupe à diamètre limite (Vézina et Paillé 1969). L'âge moyen, une fois corrigé pour tenir compte de la période d'oppression, est de 50,1 (5,8) ans. Les caractéristiques dendrométriques moyennes des tiges de sapin baumier et de leur système racinaire sont présentées aux tableaux 11 et 12, respectivement.

Tableau 11: Caractéristiques dendrométriques moyennes des tiges de sapin baumier treuillées

Site	DHS (cm)	DHP (cm)	Hauteur (m)	H/D	Poids de la tige (kN)	Poids du feuillage (kN)	Poids Total (kN)
1	22,2	20,0	15,1	76,8	1,732	0,569	2,301
2	17,4	14,6	13,2	91,0	0,898	0,291	1,189
3	16,3	13,9	13,0	93,6	0,844	0,262	1,106
4	27,2	22,4	17,0	77,4	2,407	0,756	3,163

Tableau 12: Caractéristiques moyennes des systèmes racinaires des tiges de sapin baumier treuillées et résultats des tests de  $t$

Site	Superficie (m <sup>2</sup> )	Profondeur (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
1	1,86 <sup>a</sup>	0,56 <sup>a</sup>	0,37 <sup>a</sup>
2	1,79 <sup>ab</sup>	0,48 <sup>ab</sup>	0,30 <sup>ab</sup>
3	2,06 <sup>ab</sup>	0,56 <sup>abc</sup>	0,31 <sup>abc</sup>
4	2,68 <sup>b</sup>	0,63 <sup>ac</sup>	0,57 <sup>ac</sup>

$\alpha = 0,05$

### 3.4.2) Analyses en laboratoire

#### 3.4.2.1) Analyse des échantillons de bois

L'analyse réalisée en laboratoire a permis de déterminer que douze sapins baumiers présentaient des traces de coloration du bois. De ces échantillons, un seul avait des racines affectées par *Armillaria* sp. (no 1-K). Comme pour l'épinette blanche, aucun échantillon ne révélait la présence de *Stereum sanguinolentum*.

### 3.4.2.2) Calcul du centre de gravité

La hauteur du centre de gravité (point *C*) a été calculée à l'aide de l'équation 9 et les moyennes des résultats, par site, sont présentés au tableau 13.

Tableau 13: Hauteur moyenne du centre de gravité et du point d'attache des sapins  
baumiers treuillés

Site	Hauteur moyenne du centre de gravité (m)	Hauteur moyenne du point d'attache (m)
1	5,66	7,44
2	5,58	6,50
3	5,48	6,41
4	6,65	8,25

À partir de ce tableau, il est possible de déterminer que le centre de gravité était en moyenne situé à 40% de la hauteur totale et que le point d'attache du câble, qui devait être ancré à mi-hauteur de la tige, était en moyenne situé à 49% de la hauteur totale.

### 3.4.2.3) Redressement des images et calcul du moment critique ( $M_c$ )

Suite à l'analyse d'images, il a été possible de déterminer que le centre de gravité des tiges de sapin baumier s'était déplacé en moyenne de 1,10 m sur l'axe des X et de 0,17 m sur l'axe des Y avant l'atteinte du moment critique ( $M_c$ ). Ce déplacement correspond à un angle moyen  $\angle BOB'$  de 0,193 (0,070) rad (11,069 (4,034)°). À cet angle, le moment critique est en moyenne de 14,57 (11,20) kN·m et le moment alors attribuable au poids de l'arbre au-dessus du point de rupture est en moyenne de 2,39 (1,68) kN·m (17,6 % du moment critique). La durée de treuillage nécessaire pour atteindre le moment critique variait entre 9 et 35 sec (moyenne de 19 sec). Le tableau 14 présente une description statistique des différentes variables à l'étude pour les sapins baumiers treuillés.

Tableau 14: Statistiques des différentes variables pour le sapin baumier

Variabes	$M_c$ (kN·m)	Âge (an)	DHS (cm)	DHP (cm)	$H_{tot}$ (m)	H/D	$H \cdot DHP^2$ (m <sup>3</sup> )	W (kN)	W_tige (kN)	V_rac (m <sup>3</sup> )
Moyenne	14,57	61	20,62	17,68	14,55	84,59	0,523	1,92	1,46	0,42
Écart type	11,20	18,23	5,42	4,70	2,03	10,86	0,378	1,18	0,89	0,28
Minimum	3,28	40	14,30	14,40	11,75	63,52	0,181	0,67	0,53	0,08
Maximum	52,89	103	33,20	29,90	19,10	102,90	1,708	5,52	4,15	0,98

### 3.4.3) Analyses statistiques

#### 3.4.3.1) Analyse du bris des tiges

Suite à l'examen des différentes variables à l'étude liées aux deux tiges qui se sont rompues (numéros 1-A et 2-F), les conclusions ont été semblables à celles obtenues pour l'épinette blanche, c'est-à-dire que les tiges cassées ne se comportaient pas comme des valeurs aberrantes par rapport aux tiges renversées. Elles n'ont donc pas été traitées différemment des autres en raison du bris de leur tige.

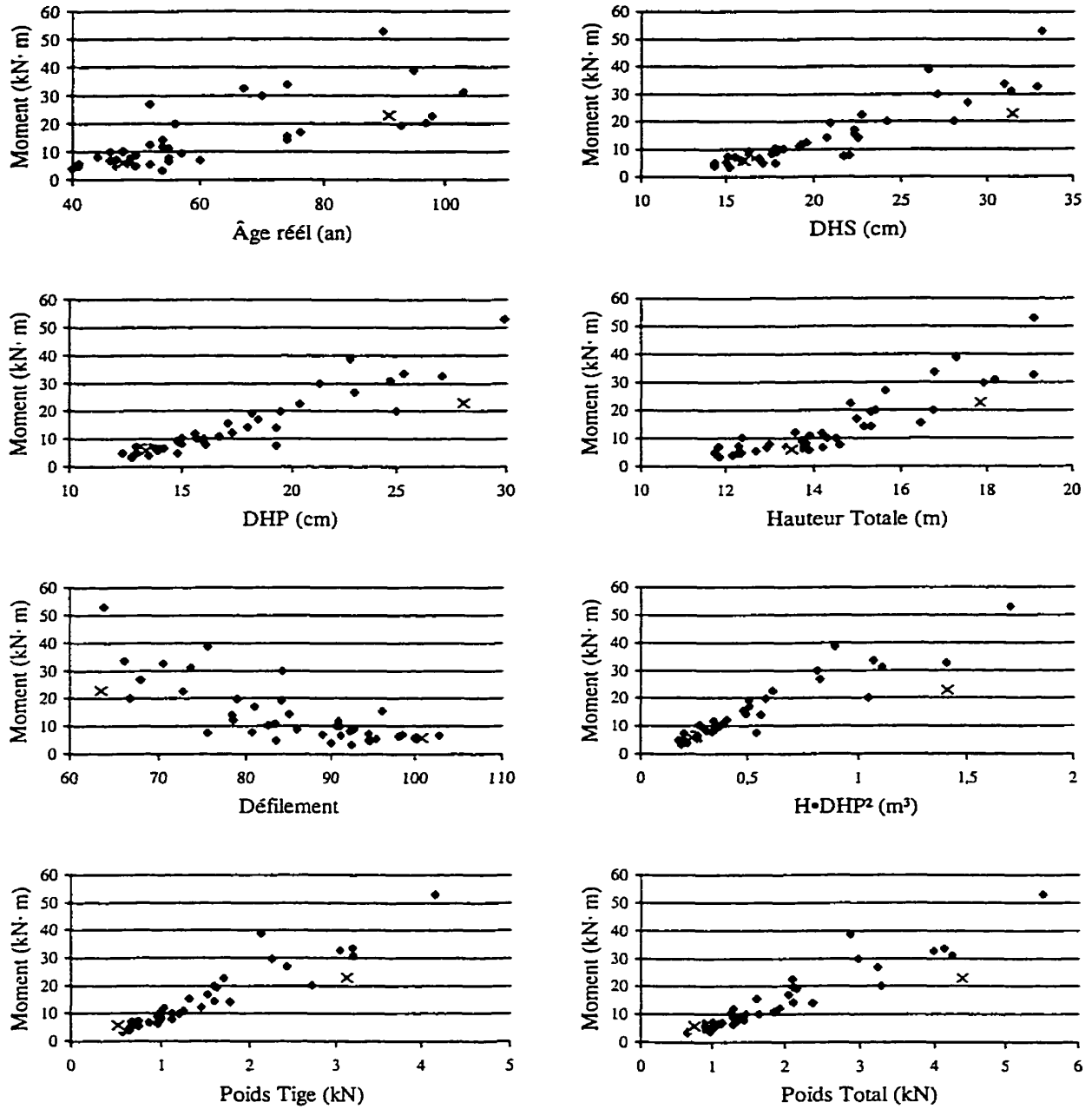


Figure 27: Comportement des tiges rompues (x) et des tiges renversées (♦) pour le sapin baumier

### 3.4.3.2) Analyse de corrélation

Une analyse de corrélation a permis d'établir qu'il y a un lien statistiquement significatif entre les différentes variables liées à la taille de l'arbre, tel que présenté au tableau 15. De ce tableau,

il ressort que contrairement à ce qui peut être observé chez l'épinette blanche, l'Âge présente une forte relation linéaire avec les autres variables liées à la taille de l'arbre, exception faite du volume du système racinaire. Par contre, tout comme chez l'épinette blanche, il n'existe pas de forte relation linéaire entre le volume du système racinaire et les autres variables à l'étude.

Tableau 15: Analyse de corrélation entre les différentes variables liées à la taille de l'arbre chez le sapin baumier (n = 41 et n = 38 pour  $V_{rac}$ )

Var.	Âge (ans)	DHS (cm)	DHP (cm)	H_tot (m)	H/D	H-DHP <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> )	W_tige (kN)	W (kN)	V_rac (m <sup>3</sup> )
Âge	1,000	<b>0,733**</b>	<b>0,747**</b>	<b>0,739**</b>	-0,630**	<b>0,724**</b>	<b>0,751**</b>	<b>0,737**</b>	0,375*
DHS	<b>0,733**</b>	1,000	<b>0,967**</b>	<b>0,916**</b>	-0,841**	<b>0,951**</b>	<b>0,959**</b>	<b>0,951**</b>	0,501**
DHP	<b>0,747**</b>	<b>0,967**</b>	1,000	<b>0,918**</b>	-0,895**	<b>0,982**</b>	<b>0,971**</b>	<b>0,970**</b>	0,479**
H_tot	<b>0,739**</b>	<b>0,916**</b>	<b>0,918**</b>	1,000	-0,668**	<b>0,918**</b>	<b>0,909**</b>	<b>0,904**</b>	0,461**
H/D	-0,630**	-0,841**	-0,895**	-0,668**	1,000	-0,829**	-0,828**	-0,832**	-0,360*
H-DHP <sup>2</sup>	<b>0,724**</b>	<b>0,951**</b>	<b>0,982**</b>	<b>0,918**</b>	-0,829**	1,000	<b>0,974**</b>	<b>0,975**</b>	0,475**
W_tige	<b>0,751**</b>	<b>0,959**</b>	<b>0,971**</b>	<b>0,909**</b>	-0,828**	<b>0,974**</b>	1,000	<b>0,997**</b>	0,516**
W	<b>0,737**</b>	<b>0,951**</b>	<b>0,970**</b>	<b>0,904**</b>	-0,832**	<b>0,975**</b>	<b>0,997**</b>	1,000	0,497**
V_rac	0,375*	0,501**	0,479**	0,461**	-0,360*	0,475**	0,516**	0,497**	1,000

\*\* Corrélation significative au seuil  $\alpha = 0,01$

Les coefficients de corrélation en gras présentent de fortes relations linéaires ( $R > 0,7$ )

### 3.4.3.3) Analyse graphique

Afin d'explorer le type de relation existant entre le moment critique ( $M_c$ ) et les variables indépendantes, un graphique du moment critique en fonction de chaque variable indépendante a été réalisé.

Tel qu'illustré à la figure 28, il n'y a qu'une faible relation linéaire entre le moment critique et le volume du système racinaire, contrairement à ce qui est illustré à la figure 27, où de fortes relations linéaires sont observées entre le moment critique et les différentes variables indépendantes.

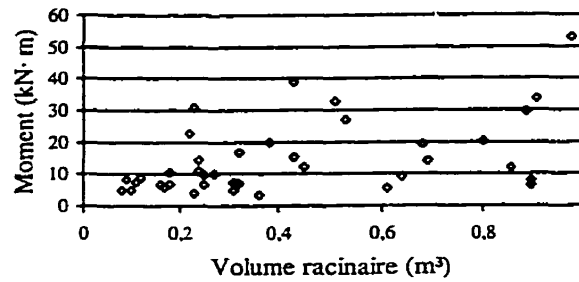


Figure 28: Faible relation linéaire entre le moment critique et le volume racinaire chez le sapin baumier

#### 3.4.3.4) Analyse des résidus

Les résultats de l'analyse des résidus pour le sapin baumier sont semblables à ceux obtenus pour l'épinette blanche. Dans certains cas où le postulat de l'homogénéité de la variance des erreurs expérimentales n'était pas respecté, la transformation de la variable dépendante et de la variable indépendante par la fonction logarithme naturel ont alors été réalisées, tel que décrit au tableau 9.

#### 3.4.3.5) Régression linéaire simple

Toutes les régressions linéaires réalisées entre le moment critique ( $M_c$ ) et les différentes variables indépendantes ( $\hat{A}ge$ ,  $W$ ,  $W_{tige}$ ,  $H_{tot}$ ,  $V_{rac}$ ,  $\ln DHP$ ,  $\ln DHS$ ,  $\ln(H \cdot DHP^2)$  et  $\ln(H/D)$ ) présentent des relations linéaires statistiquement significatives dont la forme est:  $y = \beta_0 + \beta_1 x$ . L'ordonnée à l'origine ( $\beta_0$ ), La pente ( $\beta_1$ ), le coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ), le coefficient de détermination ( $R^2$ ) ainsi que le coefficient de détermination ajusté ( $R^2a$ ) sont présentés au tableau 16.

Tableau 16: Caractéristiques des régressions impliquant le moment critique ( $M_c$ ) et les différentes variables indépendantes pour le sapin baumier

Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$r$	$R^2$	$R^2a$
Âge (an)	-13,206**	0,455**	0,741	0,549	0,538
$W$ (kN)	-2,287	8,775**	0,923	0,853	0,849
$W_{tige}$ (kN)	-3,350	11,620**	0,927	0,859	0,855
$H_{tot}$ (m)	-56,770**	4,902**	0,887	0,787	0,781
$V_{rac}$ (m <sup>3</sup> )	6,481*	19,386**	0,472	0,223	0,202
$LnDHP$	-5,023**	2,623**	0,922	0,850	0,846
$LnDHS$	-5,225**	2,547**	0,919	0,844	0,841
$\ln(H \cdot DHP^2)$	3,338**	1,055**	0,932	0,869	0,866
$\ln(H/D)$	21,508**	-4,171**	0,779	0,606	0,596

\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,05$

\*\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,01$

À partir du tableau 16, il est possible de déterminer, à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ), que la régression linéaire simple entre le moment critique et le volume du système racinaire ( $V_{rac}$ ) ( $r = 0,472$ ) ne présente pas une forte relation linéaire. Par ailleurs, la valeur de  $r$ , pour les autres variables à l'étude, varie entre 0,741 et 0,932, ce qui indique de fortes relations linéaires. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ), une fois le volume du système racinaire écarté, varie quant à lui, entre 0,549 et 0,869, ce qui indique que la régression des différentes variables indépendantes explique entre 54,9 et 86,9% de la variance du moment critique. Les différentes régressions s'ajustent bien à la population de sapins baumiers ( $R^2a$  variant entre 0,538 et 0,866).

Les figures 29, 30, 31 et 32 présentent les relations linéaires les mieux ajustées au moment critique.



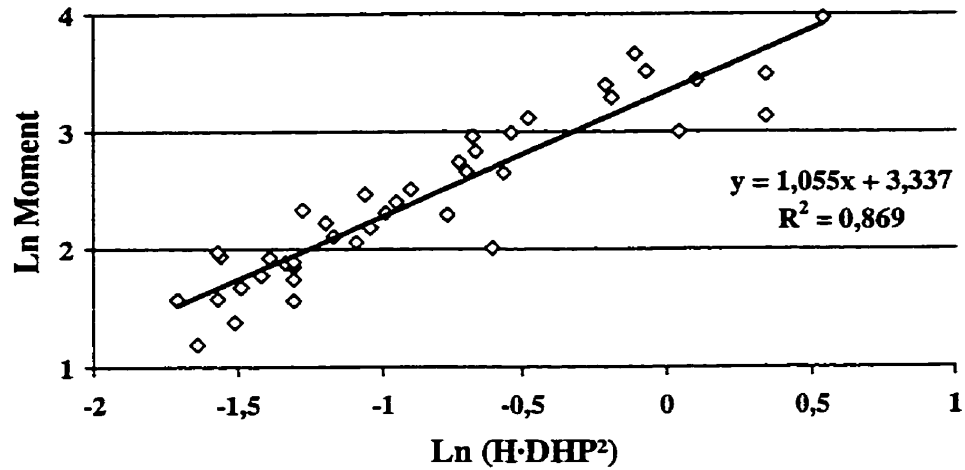


Figure 29: Relation linéaire entre le logarithme naturel du moment critique et le logarithme naturel de  $H \cdot DHP^2$  pour le sapin baumier

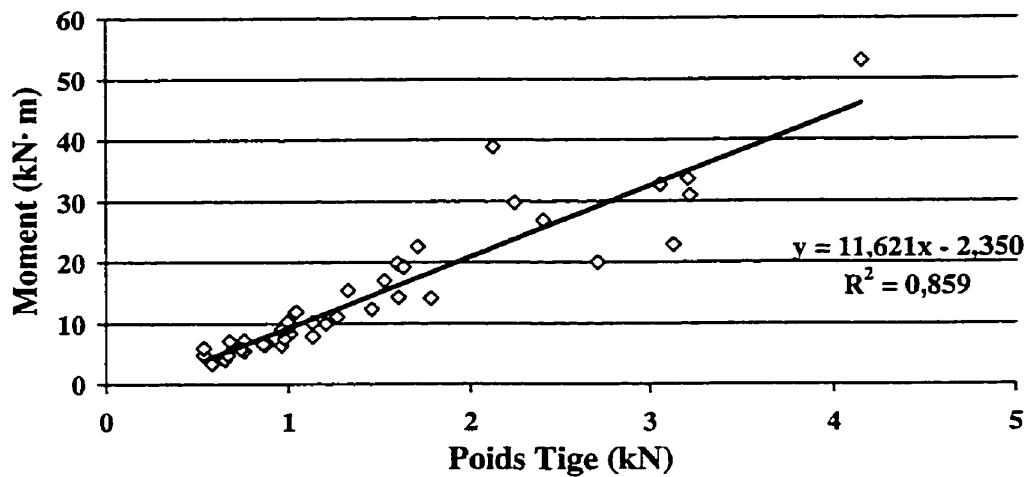


Figure 30: Relation linéaire entre le moment critique et le poids de la tige pour le sapin baumier

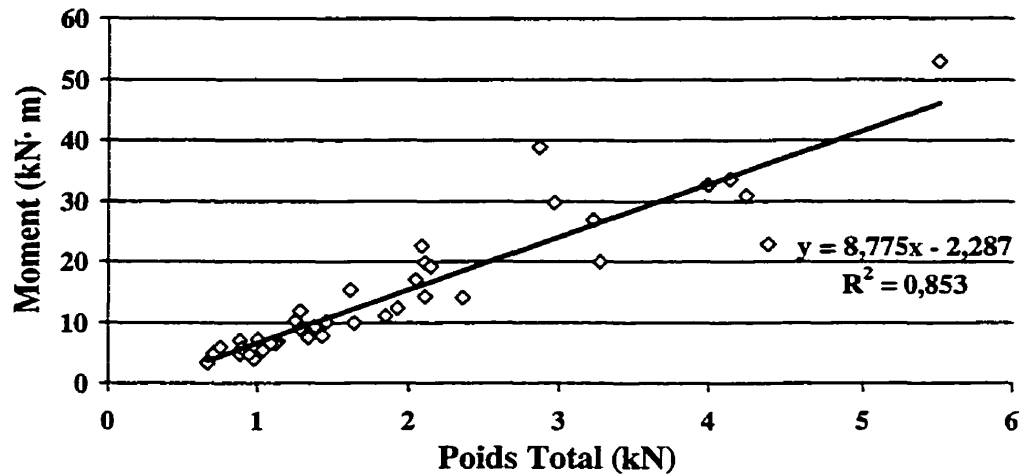


Figure 31: Relation linéaire entre le moment critique et le poids total pour le sapin baumier

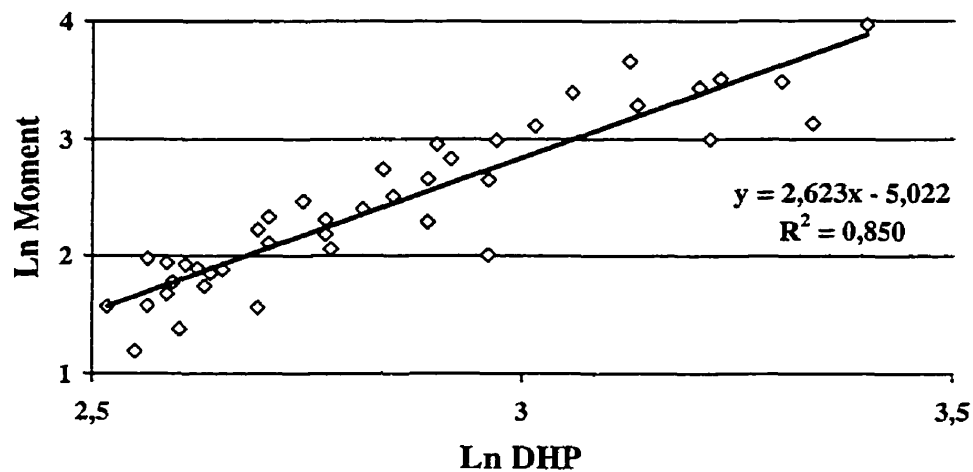


Figure 32: Relation linéaire entre le logarithme naturel du moment critique et le logarithme naturel du *DHP* pour le sapin baumier

### 3.5) COMPARAISON DES ÉQUATIONS SELON LES ESPÈCES

Toutes les variables indépendantes à l'étude ont été retenues dans le but de comparer les équations de régression obtenues pour le sapin baumier et l'épinette blanche. Le test de Chow a permis de déterminer si la pente et l'ordonnée à l'origine des équations de régression

différentes pour les deux essences à l'étude. Les paramètres nécessaires à l'élaboration du test de Chow sont:

- SCR1* : Somme des carrés des résidus de l'équation de régression comprenant tous les échantillons (épinette blanche et sapin baumier confondus)
- SCR2* : Total des sommes des carrés des résidus des équations de régression pour chaque essence séparément
- DL1* : Degrés de liberté de l'équation de régression comprenant tous les échantillons
- DL2* : Total des degrés de liberté des équations de régression pour chaque essence

Le tableau 17 présente les résultats du test de Chow.

Tableau 17: Résultats du test de Chow

Variable	<i>SCR1</i>	<i>DL1</i>	<i>SCR2</i>	<i>DL2</i>	<i>F calculé</i>
Âge (an)	5321,358	82	4930,584	80	3,170*
<i>W</i> (kN)	1832,263	82	1703,741	80	3,017
<i>W_tige</i> (kN)	1798,727	82	1683,708	80	2,614
<i>H_tot</i> (m)	2623,663	82	2315,742	80	5,319**
ln <i>DHP</i>	7,946	82	7,884	80	0,314
ln <i>DHS</i>	7,556	82	7,483	80	0,387
ln ( <i>H·DHP</i> <sup>2</sup> )	7,356	82	7,182	80	0,969
ln ( <i>H/D</i> )	15,924	82	15,552	80	0,957
<i>V_rac</i> (m <sup>3</sup> )	6979,870	75	6728,437	73	1,364

\* = Équations significativement différentes au seuil  $\alpha = 0,05$ .

\*\* = Équations significativement différentes au seuil  $\alpha = 0,01$ .

$F_{(0,01, 2, 80)} = 4,88$

$F_{(0,05, 2, 80)} = 3,11$

$F_{(0,01, 2, 73)} = 4,93$

$F_{(0,05, 2, 73)} = 3,13$

À la lumière des résultats présentés au tableau 17, les seules équations différentes à un seuil alpha ( $\alpha$ ) de 0,05 et de 0,01 pour le sapin baumier et l'épinette blanche, sont les équations impliquant l'âge réel et la hauteur totale. Les autres équations ne montrent quant à elle aucune différence significative. Les figures 33 et 34 présentent sous forme graphique la différence entre les droites de régression du sapin baumier et de l'épinette blanche pour l'Âge et la hauteur totale, alors que les figures 35 à 41 présentent les droites de régression du sapin baumier et de l'épinette blanche pour les autres variables, jugées statistiquement semblables.

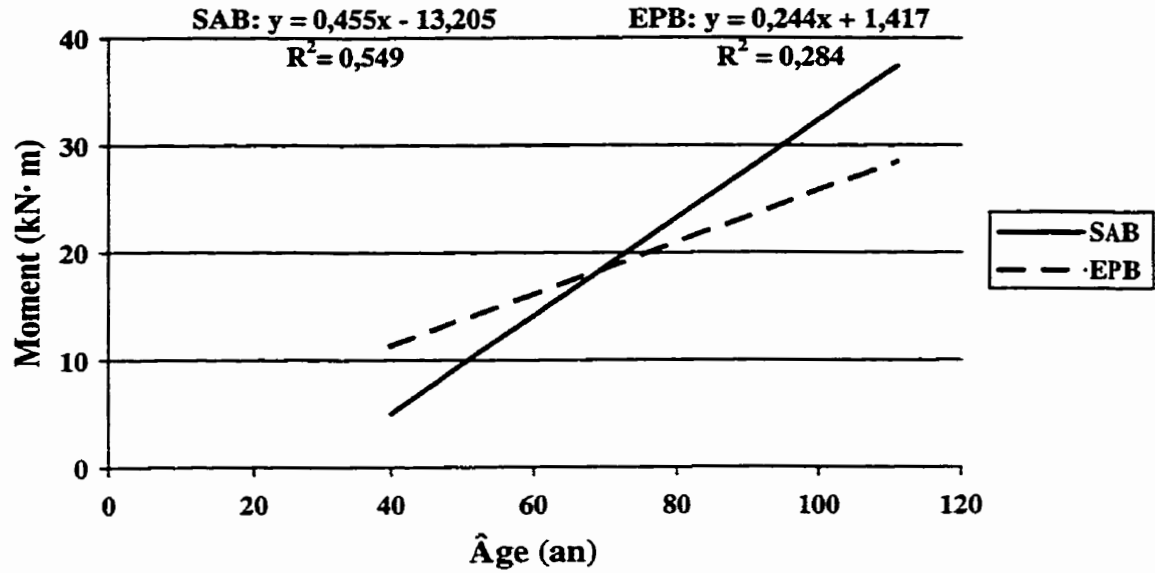


Figure 33: Comparaison des équations linéaires entre le moment critique et l'âge réel

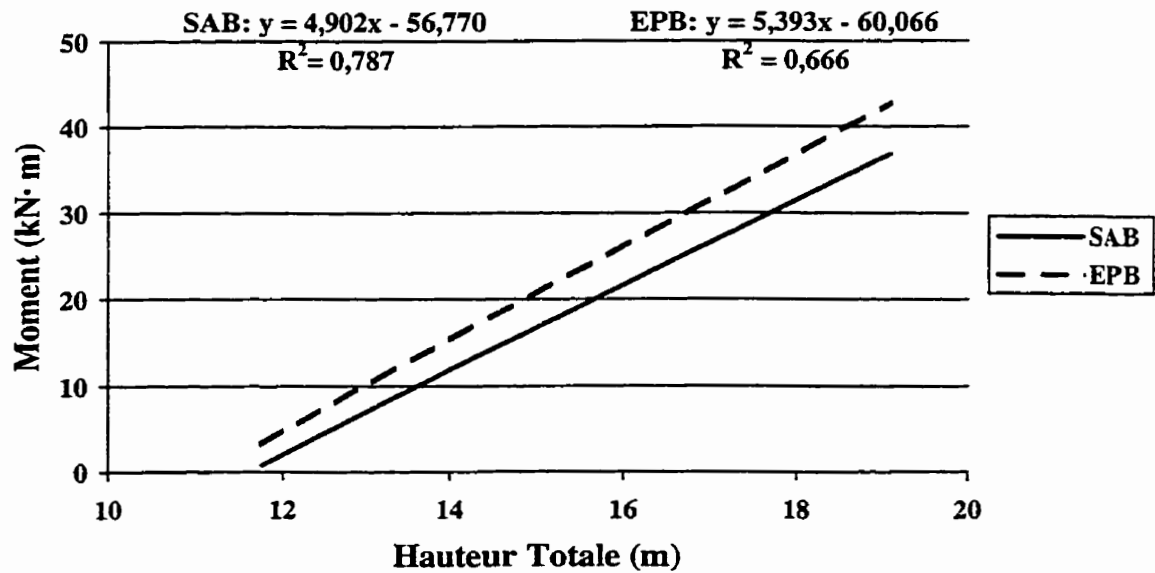


Figure 34: Comparaison des équations linéaires entre le moment critique et la hauteur totale

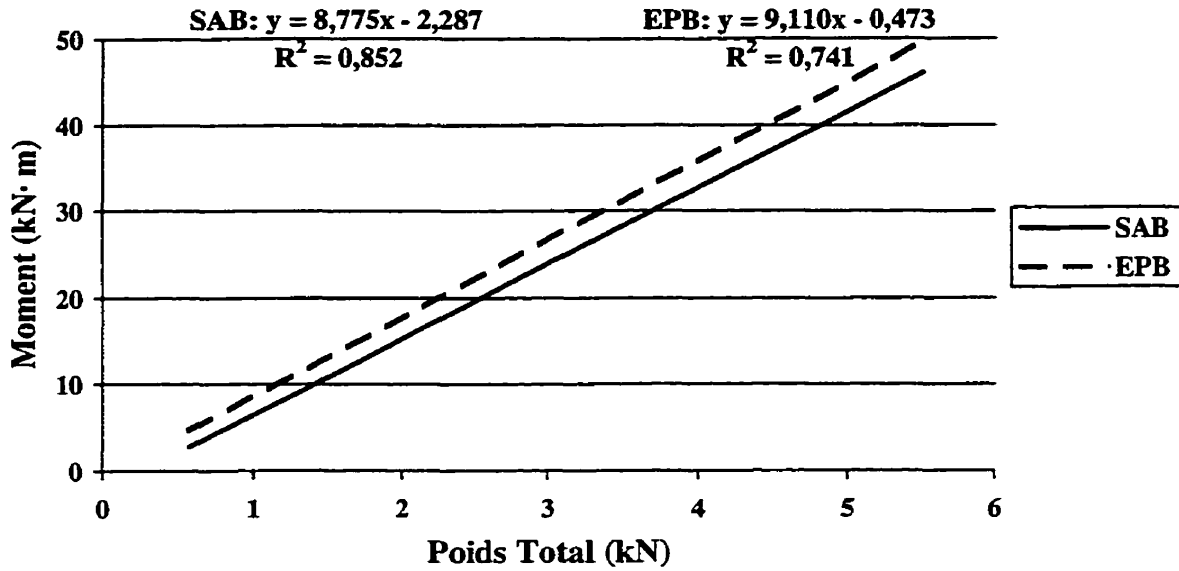


Figure 35: Comparaison des équations linéaires entre le moment critique et le poids total

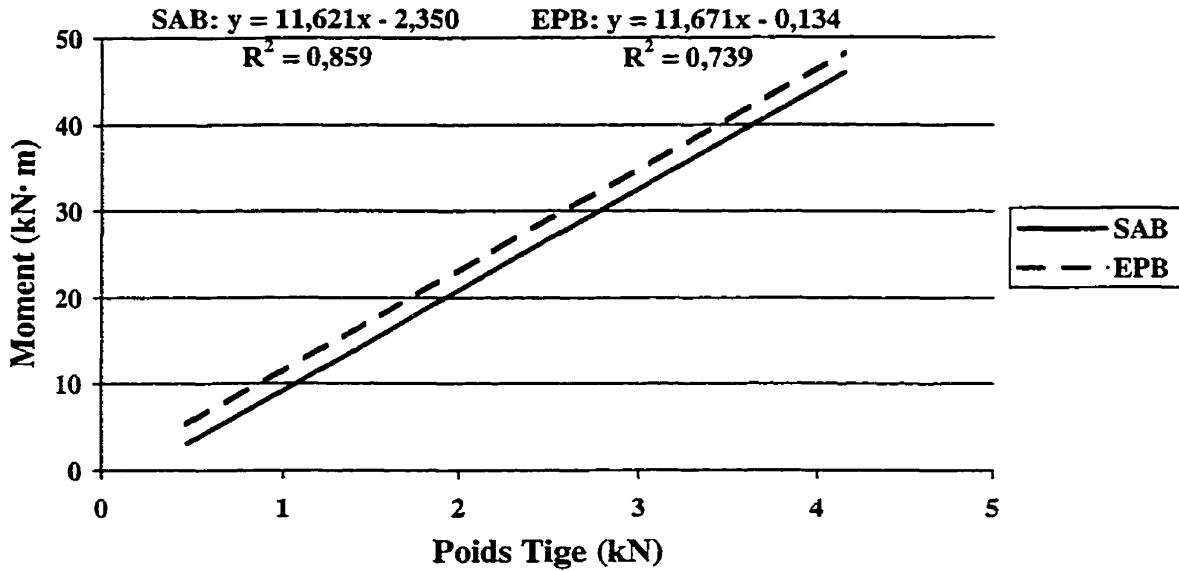


Figure 36: Comparaison des équations linéaires entre le moment critique et le poids de la tige

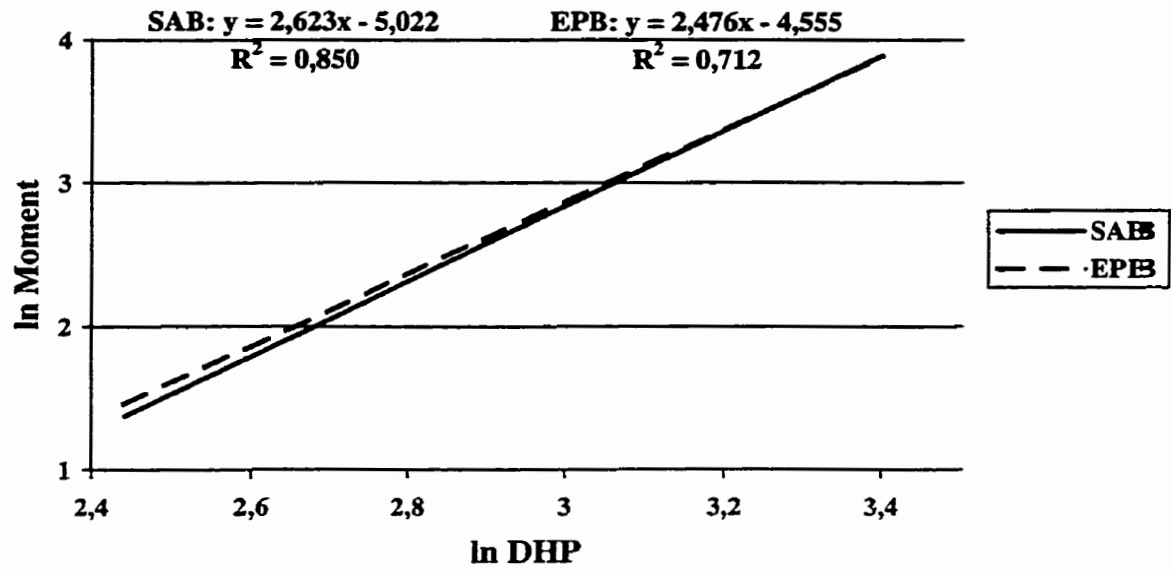


Figure 37: Comparaison des équations linéaires entre le logarithme naturel du moment critique et le logarithme naturel du *DHP*

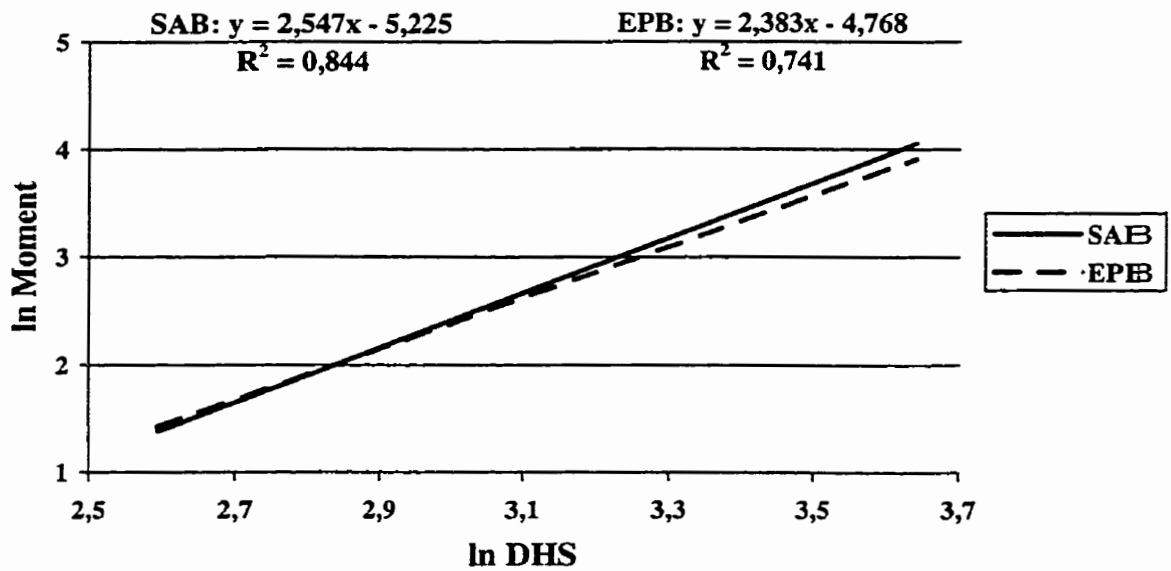


Figure 38: Comparaison des équations linéaires entre le logarithme naturel du moment critique et le logarithme naturel du *DHS*

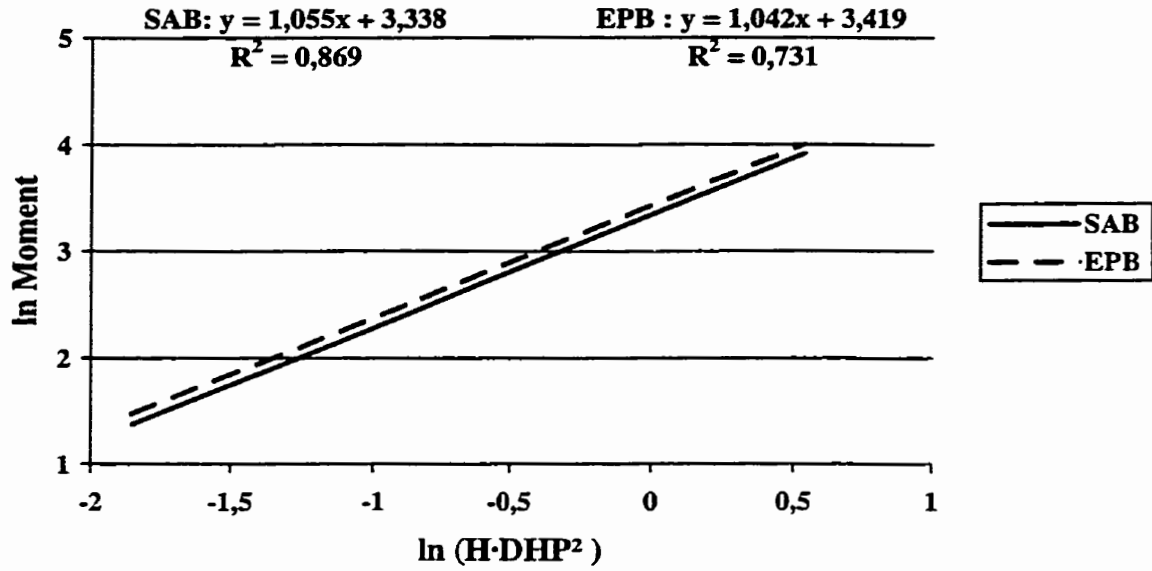


Figure 39: Comparaison des équations linéaires entre le logarithme naturel du moment critique et le logarithme naturel de  $H \cdot DHP^2$

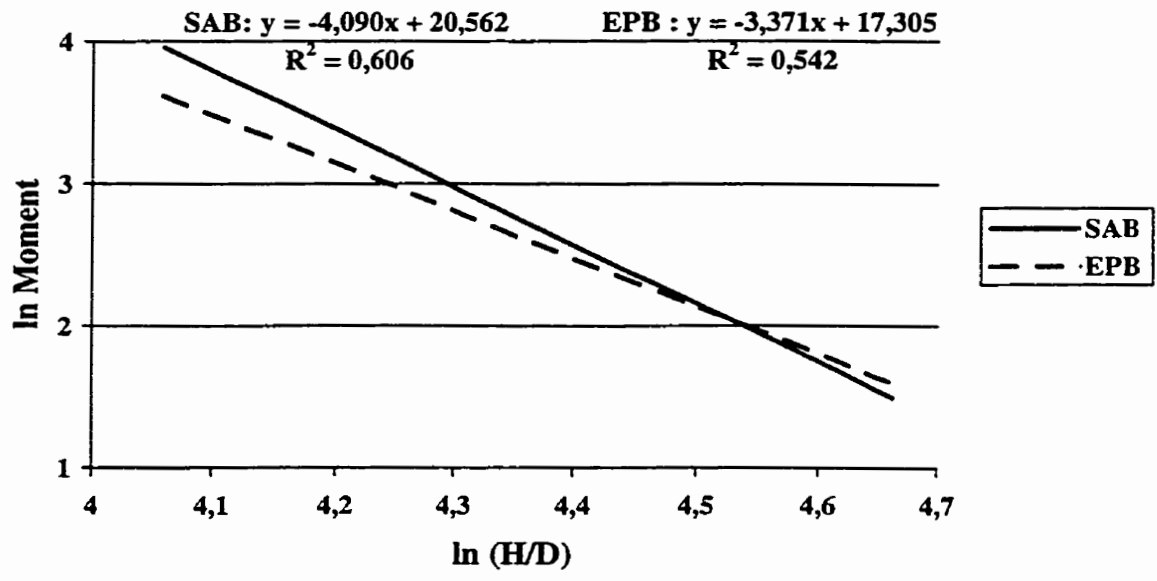


Figure 40: Comparaison des équations linéaires entre le logarithme naturel du moment critique et le logarithme naturel de  $H/D$

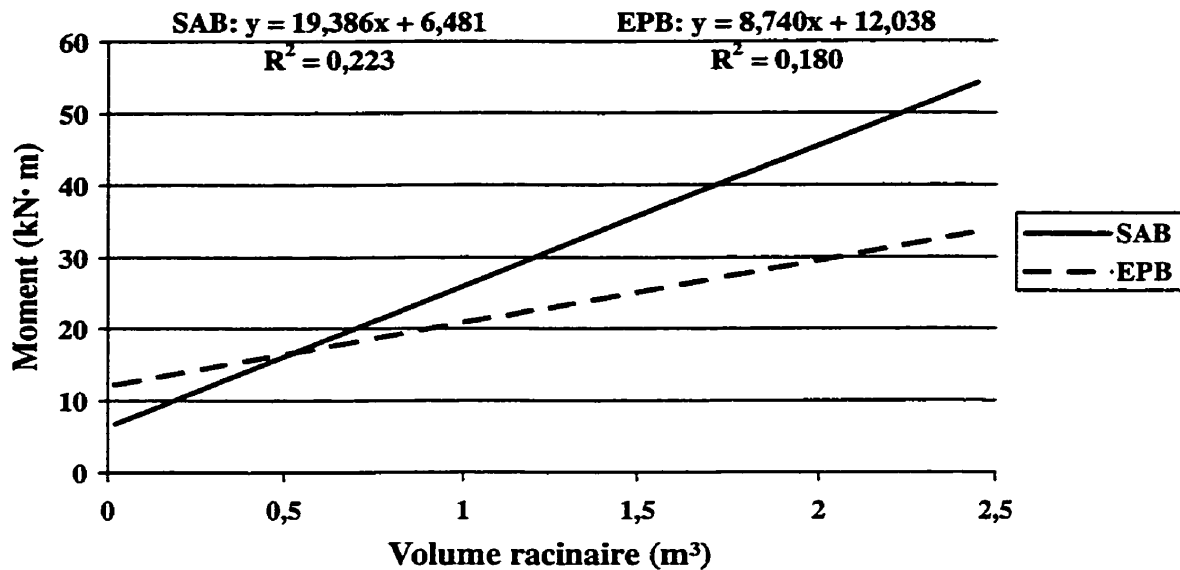


Figure 41: Comparaison des équations linéaires entre le moment critique et le volume du système racinaire

### 3.6) DISCUSSION

Dans cette section, un retour sur la méthodologie utilisée sera effectué afin d'expliquer de quelle façon celle-ci a pu affecter les résultats obtenus. Par la suite, les résultats présentés aux points 3.3, 3.4, 3.5 seront analysés et discutés.

#### 3.6.1) Considérations sur le modèle

##### 3.6.1.1) Modèle statique

Avant d'étudier les résultats du treillage, il est approprié de réviser certains points de la méthodologie, qui ont pu entre autres entraîner des lacunes dans le modèle et influencer les résultats. C'est le cas du choix du modèle à utiliser, de même que des équations servant à déterminer le moment critique, qui ne considèrent que l'application statique d'une force jumelée à l'effet de la gravité. Une des lacunes de ce modèle est que cette simulation d'une rafale de force suffisante pour renverser ou briser un arbre, omet d'inclure l'effet de l'affaiblissement du système racinaire sur la stabilité de la tige dans le vent. Cette affirmation est appuyée par Oliver et Mayhead (1974) qui ont démontré qu'une force appliquée de façon statique par temps calme ne donne pas une indication fiable de la force de vent requise pour



renverser un arbre dans une tempête. En effet, l'oscillation prolongée des tiges dans de forts vents affaiblit progressivement l'ancrage de l'arbre (Oliver et Mayhead 1974; Gardiner 1997), ce qui peut entraîner un renversement, même si la force du vent n'est pas suffisante pour que le moment critique calculé à partir d'essais de treillage soit atteint.

Par contre, une étude réalisée par O'Sullivan et Ritchie (1993), n'a présenté aucune différence statistiquement significative entre la résistance des systèmes racinaires d'arbres soumis à des forces cycliques (présence d'oscillations) et statiques (absence d'oscillation). De même, des échantillons déracinés par une série de tractions et de relâchements ont donné des résultats similaires à des essais en traction continue (Coutts 1983). Il semble que dans ces études, la comparaison des dommages aux racines et au sol n'a pas permis d'établir de différence entre les arbres treillés et ceux renversés par le vent, ce qui indique que le treillage peut donner des approximations intéressantes de la réalité observée sur le terrain.

La généralisation des résultats obtenus dans le cadre de cette étude au comportement des arbres dans le vent doit donc être faite avec précaution, mais nous considérons que le treillage statique demeure une méthode fiable pour définir et comparer la résistance au renversement du sapin baumier et de l'épinette blanche.

### **3.6.2) Considérations sur la méthodologie**

#### **3.6.2.1) Facteurs climatiques**

Lors du treillage, des bourrasques de vent ont pu affecter la force enregistrée par la cellule de charge. Le vent pouvait alors agir contre le treuil (vent soufflant en direction opposée au treillage) en diminuant la force appliquée à l'arbre et en augmentant la force enregistrée par la cellule de charge, ou agir de concert avec le treuil (vent soufflant dans la même direction que le treillage) en augmentant la force appliquée à l'arbre, mais en diminuant la force enregistrée par la cellule de charge. Lors de l'analyse vidéo, il a été possible d'observer qu'aucun arbre treillé n'avait été affecté par de très fortes rafales. Il est toutefois possible que ce facteur ait pu affecter les résultats à la hausse ou à la baisse.

### 3.6.2.2) Arbres voisins

Le dégagement d'une zone de chute avant le treuillage (figure 14) a été effectué afin que la cime de l'arbre échantillon ne puisse entrer en contact avec la cime d'autres arbres encore debouts. Ceci a permis l'enregistrement d'une résistance de l'arbre non biaisée par le contact avec d'autres cimes et ainsi d'évaluer la résistance maximale de l'arbre. Toutefois, en forêt, lors de l'oscillation des tiges dans le vent, le contact entre les cimes permet de dissiper une partie de l'énergie transférée par le vent (Savill 1983; Gardiner 1997) et la résistance réelle de la tige est liée à la résistance de l'arbre et à la résistance attribuable à son interaction avec ses voisins. Ceci fait en sorte que le moment critique mesuré sous-estime la résistance de l'ensemble du peuplement, mais présente une image plus fidèle de la résistance d'une tige dont l'environnement immédiat a été modifié par une coupe partielle.

En forêt, en plus de l'interaction de l'arbre avec la cime des voisins, il existe une résistance attribuable à l'entremêlement des systèmes racinaires (Mergen 1954; Busby 1965; Smith et al 1987; Stathers et al 1994). Cette résistance n'a pu être quantifiée dans le cadre de cette étude, faute de méthodologie développée à cet effet. Or, selon Stathers (1994), la force maximale nécessaire au renversement de l'arbre treuillé n'est pas seulement fonction des caractéristiques de l'arbre seul, mais aussi en partie des caractéristiques des systèmes racinaires des arbres voisins.

À ce jour, selon Coutts (1983), aucune des différentes techniques utilisées pour simuler l'action du vent sur les tiges ne peut tenir compte de l'effet associé à l'entremêlement des racines, ce qui limite l'extrapolation des résultats à la réalité du terrain. Toutefois, en considérant, pour cette étude, que les sites avaient une densité moyenne de près de 2120 tiges par hectare et considérant un rayon moyen d'enracinement de 1,5 m pour le sapin baumier (Bakuzis et Hansen 1965), qui peut être associé à un rayon moyen de motte déraciné de 0,79 m dans le cadre de cette étude, il est possible de déterminer par des calculs simples ( $\pi \cdot \text{rayon}^2 \cdot \text{ti}/\text{ha}$ ) que la superficie racinaire moyenne de l'ensemble des peuplements avait un indice de 1,5 (où un indice  $>1$  indique un enchevêtrement des systèmes). À partir de cet indice, il est possible de constater que les sites à l'étude ont pu présenter des chevauchements de racines ou même des greffes racinaires (Johnston 1986; Burns et Honkala 1990).

### 3.6.2.3) Angle de treuillage

Sur le terrain, suite au treuillage, il a été possible de constater de façon visuelle que certaines tiges ne s'étaient pas renversées dans l'axe du treuillage. En effet, certains arbres, une fois au sol, formaient un angle avec l'axe du treuillage qui atteignait jusqu'à 53° chez l'épinette blanche et 47° chez le sapin baumier. En raison de cet angle, certains pourraient penser que l'hypothèse no 1 du modèle de calcul du moment de force, qui stipule que la force de treuillage est appliquée dans un plan à deux dimensions (X,Y) et que l'arbre ne peut se déformer que dans ce plan, n'est pas respectée.

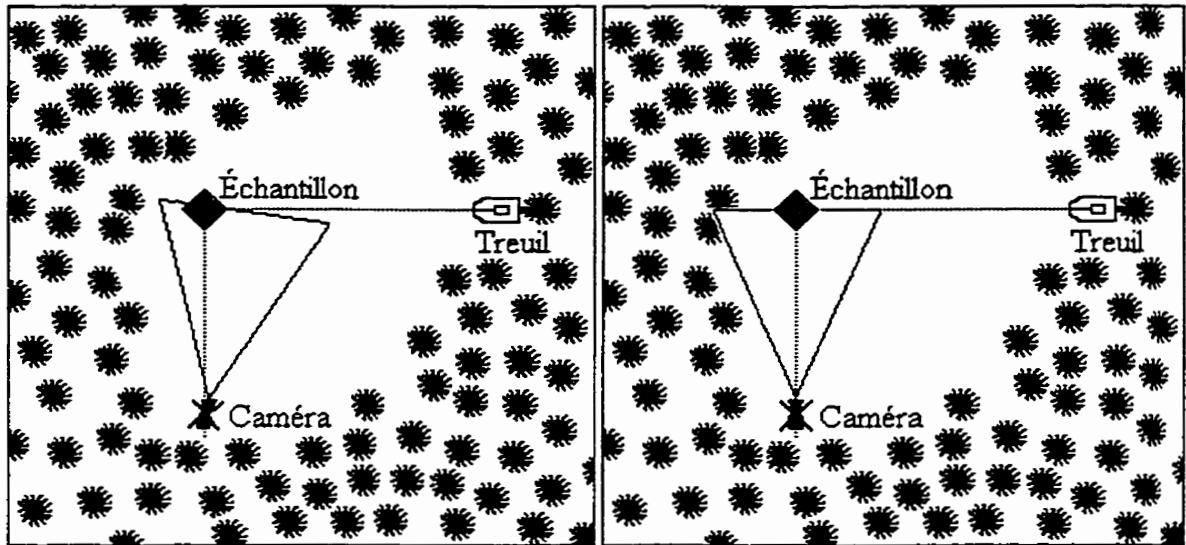
Ceci n'est pas tout à fait vrai, considérant que suite à l'analyse des déplacements du centre de gravité des tiges selon l'axe des X, des déplacements moyens de 1,61 m pour l'épinette blanche et de 1,10 m pour le sapin baumier sont observés avant l'atteinte du moment critique. Une erreur de quelques degrés sur ces déplacements ne semble pas suffisante pour induire une erreur importante dans le calcul du moment critique et n'amène pas un biais suffisamment important pour influencer les résultats.

De plus, une fois le moment critique atteint, la direction de la chute de la tige, est plus souvent affectée par la présence de fortes racines servant de pivot du côté du treuillage que par la direction de la traction. En effet, lorsque le déplacement de la tige atteint un angle de 15 à 20° par rapport à la verticale, la force gravitationnelle commence à contribuer de façon importante à la force totale appliquée à la tige (Stathers et al 1994). La force liée au poids de l'arbre prend alors de l'importance, la traction dans le câble se relâche (la vitesse de chute devient plus grande que la vitesse d'enroulement) et l'arbre se trouve libre de tomber dans la direction où la résistance est la plus faible, direction qui ne correspond pas toujours au plan de treuillage.

Des ces considérations, il ressort que l'angle noté après le treuillage n'est pas une mesure représentative de l'angle pris par la tige, du moment du départ du treuillage jusqu'à l'atteinte du moment critique.

### 3.6.2.4) Angle de l'enregistrement des images

Dans cette étude, le plan d'enregistrement de l'image ne correspondait pas exactement au plan de treuillage (figure 42), ce qui a fait en sorte que l'hypothèse no 1 du modèle n'était pas tout à fait respectée. Ceci est le résultat d'un mauvais cadrage de l'image à l'intérieur duquel l'arbre a été positionné d'un côté de l'image et non exactement au centre, comme il aurait dû l'être, tel qu'illustré ci-dessous.



A. Cadrage de l'image lors des essais de treuillage (l'axe de l'enregistrement forme un angle avec l'axe de treuillage) B. Cadrage de l'image permettant le respect de l'hypothèse no 1 (l'axe de l'enregistrement est semblable à l'axe de treuillage)

Figure 42: Cadrage de l'arbre lors des essais de treuillage (A) et cadrage de l'arbre permettant le respect de l'hypothèse no 1 (B)

Ce cadrage apparaissait nécessaire au suivi du point d'attache et du centre de gravité, en raison des observations de Silva (1996), qui recommandait que le champ de vision de la caméra soit augmenté de façon à ce que le centre de gravité demeure visible tout au long du treuillage. Grâce à cette recommandation, le centre de gravité a toujours été visible sur les images enregistrées lors de cette étude. Il est considéré que le gain de précision concernant les mesures relatives au centre de gravité compense pour la perte de précision engendrée par l'angle de la prise de vue. Cet angle aurait pu être diminué, tout en conservant le suivi du centre de gravité, en éloignant la caméra. Cette distance supplémentaire aurait cependant entraîné une plus grande imprécision lors du redressement des images.

### 3.6.2.5) Description du système racinaire

Le complexe sol-racine, mesuré dans le cadre de cette étude, selon un plan tridimensionnel à partir de la souche, fournissait trois informations soit: 1) le diamètre de la motte mesuré sur l'axe perpendiculaire au plan du treuillage, 2) le rayon de la motte soulevée, sur le même plan que celui du treuillage et 3) l'épaisseur de la motte, mesurée dans l'axe du prolongement de la tige.

De ces trois variables, seule la mesure du diamètre de la motte a pu être utilisée pour calculer la superficie moyenne du système racinaire, la mesure du rayon de la motte soulevée ayant fait l'objet d'erreurs de mesure. En effet, lorsque l'arbre se renversait, c'était la longueur de la motte arrachée au sol et non le rayon de la motte à partir du centre de la tige qui a été mesurée, surestimant du même coup le rayon du système racinaire. Cette erreur a entraîné l'abandon de la variable «rayon de la motte soulevée dans le plan du treuillage».

#### 3.6.2.5) Échantillons de racines

La plupart des échantillons de racines prélevés l'ont été, pour des raisons pratiques, sur des racines s'étant rompues en traction et en compression du côté opposé au treuillage. Lorsque les racines rompues en compression du côté même du treuillage (sous le vent) étaient facilement accessibles, elles étaient aussi prélevées et incluses dans l'échantillon (ce qui n'était pas souvent le cas).

Comme il a été mentionné au point 2.3.3.4, le bois vert est plus résistant en tension qu'en compression. Les racines du côté du treuillage (sous le vent) jouent donc un rôle critique en ce qui concerne la résistance au renversement (Mergen 1954). Étant donné que les racines qui se sont rompues du côté du treuillage (sous le vent) n'ont pas été systématiquement échantillonnées, il n'a pas été possible de déterminer si elles étaient ou non atteintes par des agents pathogènes. Cet échantillonnage non systématique ne reflétait donc qu'en partie l'état pathologique réel du système racinaire et ne permet donc que des conclusions partielles à ce sujet.

### 3.6.3) Résultats obtenus

#### 3.6.3.1) Âge des tiges

Certaines variables ont dû être abandonnées lors des analyses. C'est le cas de l'âge réel des tiges, qui n'a pas été retenu comme variable explicative du moment, car les peuplements étaient tous issus de coupes forestières effectuées durant les années 1940 à 1944 (Côté 1966). La différence d'âge réel observée sur le terrain étant liée à la dimension de la régénération laissée après coupe et non à une différence dans la période de croissance sans oppression du peuplement, la variable âge réel peut porter à confusion, laissant croire que des tiges d'une sapinière de plus de 90 ans ont été échantillonnées. Comme il n'est mentionné nulle part en littérature qu'une période d'oppression peut affecter la résistance au renversement des arbres, toutes les tiges ont été conservées pour analyse.

#### 3.6.3.2) Caractéristiques moyennes des systèmes racinaires

Pour chaque site, les comparaisons des moyennes des superficies racinaires, des profondeurs de l'enracinement et des volumes des systèmes racinaires ne présentent pas de différences entre le sapin baumier et l'épinette blanche. Prise séparément, l'épinette blanche présente des moyennes de superficies racinaires comparables de site en site, alors que les profondeurs moyennes de l'enracinement et les volumes moyens des systèmes racinaires varient. Dans le cas du sapin baumier, seules les moyennes des superficies racinaires des sites 1 et 4 sont différentes, alors que seuls les profondeurs et les volumes moyens de l'enracinement, des sites 2 et 4 varient. Ceci n'est pas étonnant, puisque les deux espèces se côtoyaient sur les sites de treuillage, dans des conditions de croissance semblables, et que, de façon générale, ce sont les conditions de croissance qui limitent l'expansion du système racinaire (Fraser 1962a; Quine et al 1995). De plus, comme il l'a été présenté précédemment, ces deux essences ont des caractéristiques d'enracinement qui se ressemblent (Bakuzis et Hansen 1965; Sutton 1969; Frank et Bjorkbom 1973; Burns et Honkala 1990; Basham 1991).

Les différents sites à l'étude ont été choisis en raison de leurs caractéristiques pédologiques comparables. Les différences observées au niveau de la profondeur des systèmes racinaires peuvent donc être attribuables soit 1) à une différence réelle de la profondeur atteinte par les racines entre les sites ou soit 2) à une erreur concernant la variable utilisée pour estimer la

profondeur du système racinaire. En effet, les sondages pédologiques visaient principalement à s'assurer de l'absence de drainage oblique (*seepage*), de l'uniformité de la texture ainsi que de la profondeur du dépôt. Dans le cas présent, les dépôts étant d'origine glaciaire et de même texture, c'est la hauteur de la nappe phréatique qui était le facteur le plus susceptible d'influencer la profondeur de l'enracinement (Miller 1985). Dans le cadre de cette étude, les conditions de profondeur de nappe phréatique étaient semblables d'un site à l'autre.

Par contre, la teneur en eau du sol, qui influence la résistance du sol et la cohésion entre le sol et les racines (Mergen 1954; Miller 1985), a pu varier puisque les tests de treuillages ont été effectués durant les mois de juillet et d'août 1996, mois au cours desquels les conditions d'humidité du sol peuvent varier. Comme aucune mesure de l'humidité du sol et de sa cohésion n'a été effectuée, il n'est pas possible d'évaluer précisément si l'état du sol était comparable tout au long du treuillage. Dans le cadre de cette étude, les conditions d'humidité du sol ont tout de même été considérées comme comparables d'un site à l'autre. Lors d'une prochaine étude de treuillage, il serait intéressant d'analyser la variation de la résistance au renversement en fonction de la teneur en humidité du sol, au moment du treuillage et ainsi de voir si les conditions d'humidité du sol sont comparables durant toute la période de treuillage.

D'un autre côté, la mesure de la profondeur de l'enracinement de chaque tige renversée ne portait que sur l'épaisseur de la motte composée de terre et de racines soulevée lors du renversement, celle-ci a pu ne pas représenter la profondeur réelle atteinte par les racines. En effet, la variation de la teneur en humidité du sol (période sèche ou pluvieuse) a pu affecter la quantité de sol retenue par les racines et par conséquent la profondeur de l'enracinement mesurée. Par conséquent, le fait d'avoir des différences significatives de profondeur d'enracinement ne signifie pas que les conditions de croissance des racines étaient différentes d'un site à l'autre.

#### 3.6.3.3) Carie des racines

Les résultats de l'analyse des échantillons de bois ont révélé que trois épinettes blanches et qu'un sapin baumier avaient des racines attaquées par *Armillaria* sp. (4,8%). La carie de racines causée par l'armillaire est la plus commune des caries de racines retrouvées en forêt

(Whitney 1988), et aussi la plus importante des caries de racines connues à ce jour au Québec (Innes et al 1994). Parmi les huit types biologiques d'armillaire retrouvés en Amérique du Nord (Whitney 1988), certains sont fortement pathogènes, d'autres se développent sur des arbres affaiblis, tandis que d'autres sont saprophytes (Innes et al 1994).

Dans le cadre de cette étude, le type biologique d'armillaire attaquant les échantillons n'a pas été déterminé. Il est donc impossible de déterminer s'il s'agissait d'un type biologique fortement pathogène ou d'un type se développant sur une racine affaiblie. De plus, comme la récolte de l'information pathologique n'a pas été réalisée en fonction de la grosseur des racines, il n'est pas possible de déterminer à quelle grosseur de racine l'armillaire était associée et donc de prédire, simplement à partir des données pathologiques obtenues, si la présence d'armillaire est susceptible d'affecter la résistance des arbres.

La faible quantité de carie retrouvée dans les échantillons peut s'expliquer par l'âge des peuplements étudiés ainsi que par la méthodologie utilisée. Lortie (1968) observe que le nombre d'arbres présentant des défauts est beaucoup plus élevé dans les sapinières à *Hylocomium* de 70 ans que dans celles de 50 ans. De plus, il constate que le nombre de défauts accompagnés de carie augmente avec l'âge.

Dans la présente étude, comme l'âge moyen des peuplements étudiés varie entre 50 et 60 ans, celui-ci peut en partie expliquer la faible quantité de carie retrouvée dans les échantillons. De plus, le fait d'éliminer systématiquement de l'échantillonnage préliminaire les tiges possédant des défauts apparents (fente, fourche, champignon, etc.) a certainement joué un rôle important sur la faible quantité de carie observée dans les tiges treuillées.

#### 3.6.3.4) Hauteur du centre de gravité

Suite à la pesée des différentes sections de l'arbre échantillon, il a été possible de déterminer la position du centre de gravité. En moyenne, il est situé pour l'épinette blanche et le sapin baumier respectivement, à 40,4% et à 40% de la hauteur totale de la tige. Comme le point d'attache du câble était située en moyenne à 48% et 49% de la hauteur totale, pour l'épinette blanche et le sapin respectivement, et sachant que la position du centre de gravité ne peut être



déterminée avant le treuillage, il est considéré que le treuillage simule bien l'action du vent, en agissant au niveau du centre de gravité.

#### 3.6.3.5) Calcul du moment critique

Dans le cadre du calcul du moment critique, contrairement à ce qu'avait réalisé Silva (1996), le poids du câble n'a pas été inclus, en raison de sa faible contribution au moment total. Ceci a permis une simplification des calculs, sans entraîner une grande perte de précision.

En ce qui concerne la contribution de la gravité, les résultats démontrent que le moment attribuable au poids de l'arbre au-dessus du point de rupture représente pour l'épinette blanche et le sapin baumier respectivement, en moyenne 20,0% et 17,6% du moment critique. Le moment dû à la gravité n'est donc pas négligeable en ce qui concerne le calcul du moment critique et semble contribuer significativement au renversement de la tige.

#### 3.6.3.6) Analyse du bris de tige

Il a été mentionné dans les résultats que les tiges qui s'étaient rompues (no 2-9, 4-6, 4-7, 4-9, 1-A et 2-F) ne se comportaient pas comme des valeurs aberrantes. Elles n'ont donc pas été traitées différemment des autres en raison du bris de leur tige, contrairement à d'autres auteurs, qui ont préféré les retirer de leurs analyses. C'est le cas de Smith et al (1987), qui ont éliminé les tiges cassées de leur échantillonnage car elles présentaient des caractéristiques différentes des tiges renversées, principalement au niveau du tronc, qui était attaqué par des champignons de carie.

Dans la présente étude, parmi tous les échantillons qui se sont rompus lors du treuillage, seuls l'épinette blanche 4-6 et le sapin baumier 1-A, ont présenté des signes visuels de carie au niveau de la souche. Ces signes de carie au niveau de la souche n'ont toutefois pas été confirmés par l'analyse en laboratoire, tout comme l'analyse des échantillons de bois prélevés au niveau du point de rupture n'a pas révélé la présence de carie. Comme aucun test autre qu'un examen visuel n'a été réalisé sur le terrain, il est possible de penser que la carie observée n'était qu'une simple coloration du bois. Considérant cette hypothèse, il est donc justifié de ne pas éliminer de l'échantillonnage les tiges 4-6 et 1-A.

### 3.6.3.7) Analyse de corrélation

Les résultats de l'analyse de corrélation démontrent la présence de liens statistiquement significatifs entre les variables liées à la taille de l'arbre ( $W$ ,  $W_{tige}$ ,  $H_{tot}$ ,  $DHP$ ,  $DHS$ ,  $H \cdot DHP^2$  et  $H/D$ ). Le contraire aurait été étonnant, puisque les différentes variables étudiées sont plus ou moins directement des mesures de la dimension de l'arbre.

Ces variables ont été choisies afin de déterminer celle qui explique mieux le moment critique et de pouvoir répondre à une attente de la part des intervenants forestiers sur le sujet.

### 3.6.3.8) Analyse graphique

En analysant graphiquement le moment critique en fonction des différentes variables indépendantes, il est possible d'observer la présence ou l'absence de relation linéaire entre les variables, mais aussi la présence de valeurs extrêmes. En effet, une épinette blanche (no 4-5) et un sapin baumier (no 4-A) se distinguent des autres sur la plupart des graphiques. En observant la description de ces tiges, il est possible d'observer que ces deux tiges ont les plus grands diamètres, les hauteurs totales les plus élevées et bien entendu les poids les plus importants, qu'elles sont âgées de 104 et 90 ans respectivement et qu'elles ont été échantillonnées sur le site 4, sur lequel certaines tiges de sapin baumier ont présenté une période d'oppression de près de 50 ans.

L'explication à cette situation est que ces tiges ont pu avoir une taille légèrement inférieure au diamètre récolté lors des coupes des années 1940 et c'est pourquoi elles étaient encore présentes au moment de cette étude. Bien qu'elles se démarquent nettement du reste de l'échantillonnage et qu'elles puissent avoir un effet de levier à la baisse ou à la hausse sur les équations de régression, elles ne peuvent être éliminées de l'étude pour ces seules raisons. En effet, il faudrait alors rejeter la quasi-totalité des tiges du site no 4 et quelques tiges du site no 1, ce qui constituerait des pertes financières considérables, en plus de se priver d'échantillons représentant des tiges qui pourraient très bien se retrouver, dans quelques années, parmi les tiges restantes d'une coupe partielle.

### 3.6.3.9) Analyse des résidus

Lors de l'analyse des résidus, certaines variables, soit le *DHP*, le *DHS*, le *H/D* et la relation  $H \cdot DHP^2$  ne respectaient pas le postulat de l'homogénéité de la variance. Dans ces cas, la moyenne des différents sites était corrélée de façon positive avec la variance (aux moyennes plus élevées étaient associées des variances plus élevées). Cette situation s'explique par la variabilité des diamètres rencontrés sur les différents sites, car c'est la hauteur totale des tiges ainsi que les caractéristiques pédologiques des sites qui étaient à la base de la sélection des sites. Bien que l'hétérogénéité de la variance doive être corrigée, la plage de diamètres échantillonnée permet aux équations produites d'être valables pour une plus vaste gamme de diamètres.

### 3.6.3.10) Régression linéaire simple

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude permettent d'affirmer que les variables décrivant la taille de l'arbre, telles que le poids de la tige ( $W_{tige}$ ), le poids total ( $W$ ), le produit de la hauteur par le carré du *DHP* ( $H \cdot DHP^2$ ), le *DHS*, le *DHP*, et la hauteur totale ( $H_{tot}$ ) expliquent bien la variation du moment critique, et ce tant chez l'épinette blanche que chez le sapin baumier. Ceux-ci viennent donc appuyer les résultats obtenus par Silva et al (1998), Fredericksen et al (1993), Smith et al (1987), Fraser et Gardiner (1967) et Fraser (1962a) qui ont démontré que le moment critique était corrélé au poids de la tige, au poids total ainsi qu'à la combinaison de la hauteur totale et du poids de la cime.

Il est normal de s'attendre à ce que le moment critique soit corrélé au *DHP*, à la hauteur totale ainsi qu'au produit de la hauteur totale et du carré du *DHP*, de même qu'à toutes les variables qui sont corrélées au *DHP* et à la hauteur totale, puisque la force maximale que peut supporter une tige cylindrique augmente en fonction du cube du rayon et diminue en fonction de la longueur (voir équ. 3) (Niklas 1992). Ces résultats sont en accord avec la théorie de la croissance adaptative qui stipule qu'un arbre passe son existence à préserver une structure optimale en s'adaptant continuellement aux forces extérieures auquel il est exposé (Mattheck 1991; Wood 1995). Pour se maintenir sur pied, l'arbre doit augmenter sa résistance au renversement à mesure que sa taille augmente, de façon à contrer un moment de force toujours plus grand.

La variable qui explique la plus grande partie de la variance du moment critique pour l'épinette blanche est le poids de la tige ( $W_{t\grave{e}ge}$ ) ( $R^2 = 0,766$ ), alors que pour le sapin baumier, cette variable vient tout juste au second rang ( $R^2 = 0,863$ ) soit un  $R^2$  de 0,009 de moins que pour  $\ln(H \cdot DHP^2)$ . Cette variable a aussi été utilisée pour définir la taille de l'arbre et calculer le moment critique dans les études de Fraser (1962a), Fraser et Gardiner (1967), ainsi que dans le modèle Britannique *ForestGales* (Gardiner et al 1997). L'équation du moment critique en fonction du poids de la tige, obtenue dans le cadre de cette étude, pour le sapin baumier, se compare à l'équation qui était utilisée jusqu'à tout récemment dans le modèle *ForestGales* (Ruel et al 2000). En effet, bien que l'équation de régression du modèle Britannique ait été élaborée à l'aide de régressions obtenues pour *Abies grandis* (Doug. Ex. D. Don) et *Abies procera* (Rehd.), sur des sites où l'enracinement n'était pas restreint, elle se compare facilement à celle obtenue lors de la présente étude de treuillage (Ruel et al 2000). Il est donc possible de considérer que dans des conditions de croissance comparables, si les équations obtenues pour le sapin baumier sont semblables à celles estimées à partir de données pour des sapins dont les caractéristiques d'enracinement sont différentes (Burns et Honkala 1990), alors, les équations obtenues dans le cadre de cette étude peuvent être utilisées à plus grande échelle dans la zone de la forêt boréale. D'autres études seront toutefois nécessaires pour valider les équations obtenues dans des conditions de croissance différentes.

Dans le cadre de cette étude, les équations de régressions n'ont pas été forcées par l'origine, puisque la relation à modéliser ne comprenait pas de valeurs près de zéro. En effet, bien qu'il soit logique de penser que la résistance au renversement d'une tige de taille nulle soit elle aussi nulle, le fait d'utiliser une équation dont l'ordonnée à l'origine est différente de zéro permet une meilleure approximation du comportement de la population dans l'intervalle de l'échantillon (Snedecor et Cochran 1971). Par ailleurs, comme les problèmes de renversement sont le plus souvent associés aux stades perchis et futaie (Busby 1965; Savill 1983; Smith et al 1987), il n'est pas nécessaire de prédire la résistance au renversement d'arbres de taille se rapprochant de la valeur zéro.

### 3.6.3.11) Comparaisons interspécifiques

Parmi les relations impliquant le moment critique qui ont été étudiées, la seule significativement différente entre les deux espèces est celle impliquant la hauteur totale. Elle est présentée à la figure 34. De cette figure, il ressort que pour une même hauteur totale, l'épinette blanche possède un moment critique plus élevé que le sapin baumier. La relation hauteur totale / *DHP* (figure 43), significativement différente pour les deux essences, peut expliquer cette situation.

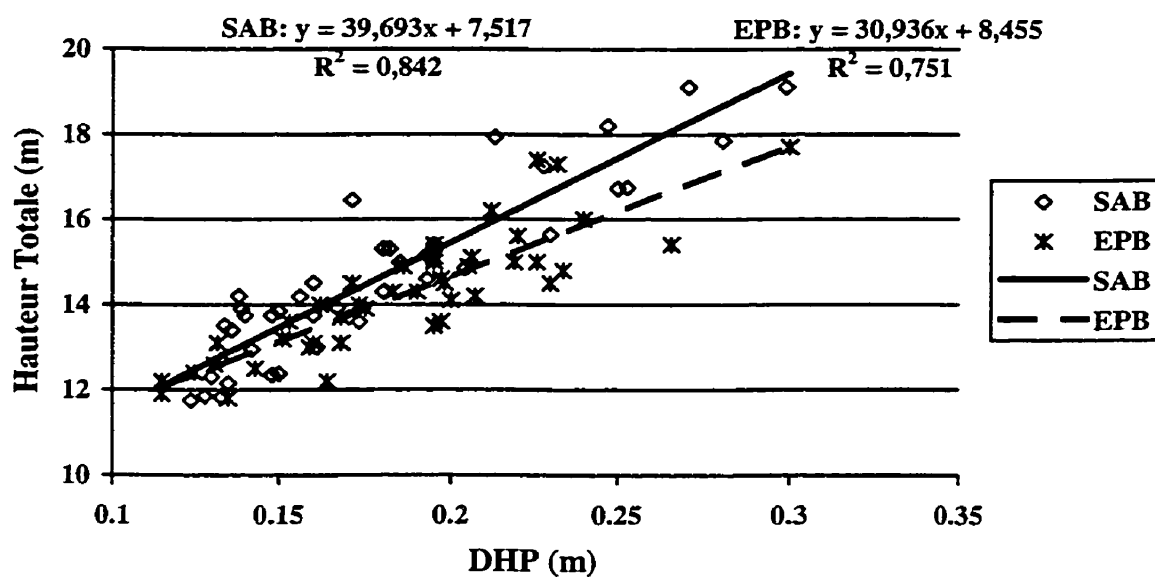


Figure 43: Comparaison des équations de la hauteur totale en fonction du *DHP* chez le sapin baumier et l'épinette blanche

En effet, la comparaison des équations effectuée à l'aide du test de Chow, révèle une différence hautement significative ( $F = 10,21^{**}$ ) entre les relations hauteur totale / *DHP* ( $H/D$ ) des deux essences. Le rapport  $H/D$  étant plus faible chez l'épinette blanche que chez le sapin baumier, ceci implique que, pour une hauteur totale donnée, le *DHP* est plus élevé chez l'épinette que chez le sapin. Cette différence de rapport  $H/D$  se traduit par une résistance accrue en flexion (Petty et Worrel 1981), d'où un moment critique plus élevé pour une hauteur donnée.

Si la tige de l'arbre est comparée à une colonne cylindrique, il est possible de déterminer que la résistance à la flexion est le produit du module d'élasticité et du moment d'inertie (Niklas 1992; Fredericksen et al 1993; Wood 1995). Comme le module d'élasticité est lié à la densité du bois (Mosbrugger 1990) et que le moment d'inertie est une fonction du rayon élevé à la quatrième puissance (Niklas 1992; Fredericksen et al 1993), il est possible d'affirmer que si les densités de bois sont comparables entre les essences, une tige dont le diamètre est plus élevé aura une résistance en flexion plus élevée qu'une autre dont le diamètre est plus faible. Il est donc possible de conclure, à la lumière de ces hypothèses, que les tiges possédant un rapport  $H/D$  faible sont plus résistantes au renversement que les tiges dont le rapport  $H/D$  est plus élevé, conclusions semblables à celles de Petty et Worrell (1981), Savill (1983), De Champs (1987) et Peltola et Kellomäki (1993).

De façon générale, dans la littérature, la résistance au renversement de l'épinette blanche et du sapin baumier est principalement basée sur l'enracinement et présente ces deux essences comme susceptibles au chablis sur des sols imparfaitement drainés (Nienstaedt 1957; Bakuzis et Hansen 1965; Burns et Honkala 1990). Malheureusement, aucune de ces affirmations ne se base sur une comparaison de ces deux essences sur un même site. Il en est de même pour les autres essences, car avant celle-ci, aucune étude de treuillage n'avait comparé deux essences présentes sur les mêmes sites. D'où l'originalité de la présente étude, qui permet de comparer la résistance au renversement de l'épinette blanche et du sapin baumier en éliminant les biais dus aux caractéristiques du site.

Une étude réalisée par McClintock (1954) dans l'état du Maine et dans le nord du New Hampshire, portant sur les dommages causés par le vent dans des peuplements de sapin et d'épinette traités par coupe partielle, arrive à la conclusion que le sapin baumier est presque trois fois plus susceptible aux dommages causés par le vent que les épinettes, suite à une coupe partielle. Dans cette étude, il s'agissait principalement d'épinette rouge (*Picea rubens* Sarg.), l'épinette blanche étant une essence compagne. Les tiges de sapin baumier affectées par le vent s'étaient rompues dans une proportion de 60%, et presque toutes présentaient des caries de souche. Il en ressort que c'est la susceptibilité du sapin baumier à la carie qui le rend plus vulnérable au chablis (Bakuzis et Hansen 1965; Whitney 1976; Johnston 1986; Burns et

Honkala 1990). En l'absence de carie, la résistance au renversement de sapins baumiers et d'épinettes blanches de même rapport  $H/D$  devrait être comparable.

### 3.7) CONCLUSIONS

La méthodologie utilisée lors de cette étude, bien que ne pouvant tenir compte de tous les facteurs liés à la résistance des arbres, demeure une méthode valable pour évaluer la résistance au renversement d'une tige soumise à une force statique.

Les résultats concernant l'analyse pathologique des échantillons ont révélé une faible présence de carie de racine. Comme les arbres affectés par ces pathogènes ne possédaient pas un moment de force différent des autres et bien que l'échantillonnage des racines brisées n'ait pas été systématique, rendant incomplet le portrait concernant la présence de carie, les relations obtenues sont tout de même considérées comme l'expression de la résistance au renversement d'arbres sains.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude viennent confirmer l'hypothèse que le moment critique est fortement lié à la taille de l'arbre, tant chez le sapin baumier que chez l'épinette blanche. Parmi toutes les variables étudiées en fonction de leur relation linéaire avec le moment critique ( $M_c$ ), chez l'épinette blanche et le sapin baumier respectivement, ce sont le poids de la tige ( $W_{t\grave{e}ge}$ ) et le logarithme naturel du produit de la hauteur par le carré du  $DHP$  ( $\ln(H \cdot DHP^2)$ ) qui expliquent le mieux la variance du moment critique. L'hypothèse que le poids total ( $W$ ) est la variable la mieux corrélée au moment critique n'est donc pas respectée, car avec un  $R^2 = 0,761$  pour l'épinette blanche et un  $R^2 = 0,859$  pour le sapin baumier, cette variable se retrouve au troisième rang des variables expliquant le mieux la variance du moment critique.

Pour ce qui est de la comparaison des équations définissant le moment critique chez les deux essences à l'étude, seules les relations entre le moment critique et la hauteur totale sont significativement différentes. Cette différence s'explique par un rapport  $H/D$  significativement plus faible chez l'épinette blanche, d'où une résistance plus élevée au renversement. Il est alors possible de conclure que les tiges ayant un plus faible  $H/D$  sont à favoriser lors de la sélection

de tiges à conserver dans le cadre de coupes partielles.

Dans le cadre de cette étude, la cime de l'arbre a été utilisée pour déterminer le moment de force induit par la gravité. Les données récoltées sur le terrain permettent aussi de modéliser l'emprise du vent dans la cime. Il est ainsi possible de calculer la vitesse de vent nécessaire à l'atteinte du moment critique et de comparer les vitesses moyennes obtenues pour l'épinette blanche et le sapin baumier. Il sera alors possible de déterminer si les tiges dont le rapport  $H/D$  est plus faible possèdent une vitesse critique plus élevée.



# VITESSE ASSOCIÉE AU MOMENT CRITIQUE ENGENDRANT LE CHABLIS DES TIGES DE SAPIN BAUMIER ET D'ÉPINETTE BLANCHE

## 4.1) INTRODUCTION

Le feuillage ainsi que les branches composant la cime des arbres agissent comme une voile qui transmet l'énergie du vent au tronc et au système racinaire. Des différences au niveau des caractéristiques des cimes entraîneront alors des comportements différents des arbres dans le vent. Le comportement dynamique des arbres dans le vent (oscillation des branches et du tronc, diminution de la surface frontale avec l'augmentation du vent) rend impossible l'évaluation rapide de la vitesse de vent nécessaire au renversement d'arbres d'essences différentes (Quine 1995). Ceci est malheureux puisque le calcul de cette vitesse de vent est essentiel au calcul du moment critique nécessaire au renversement. Pour déterminer cette vitesse critique, Smith *et al.*(1987) ont développé une méthodologie utilisant les données d'études de treillage statique, afin de relier la résistance maximale des arbres à la vitesse moyenne du vent nécessaire au renversement.

La présente partie de cette étude vise à comparer les caractéristiques des cimes de sapins baumiers et d'épinettes blanches pour ensuite déterminer la vitesse moyenne du vent associée à l'atteinte du moment critique, à l'aide de la méthodologie développée par Smith *et al.*(1987) pour des tiges nouvellement exposées en bordure de peuplement, de même que pour celles situées l'intérieur du peuplement.

### 4.1.1) Mécanisme de transfert d'énergie

L'énergie transmise à l'arbre par le vent est le résultat de la résistance qu'opposent les feuilles, les branches et le tronc à l'écoulement de l'air (Niklas 1992; Quine et al 1995). Cette quantité d'énergie varie en fonction de la vitesse du vent, de la position de l'arbre dans le couvert forestier (figure 44), de la densité du peuplement de même que de la distance de la tige à la lisière du peuplement (Buck 1964; Fritschen 1985). En effet, les tiges dominantes, les tiges des peuplements ouverts et les tiges situées en bordure des peuplements sont plus exposées au

vent que les tiges des étages inférieurs, des peuplements denses ou celles se situant à une bonne distance dans le peuplement (Busby 1965; Somerville 1980; Savill 1983; Quine et al 1995; Ruel 1995; Peltola 1996).

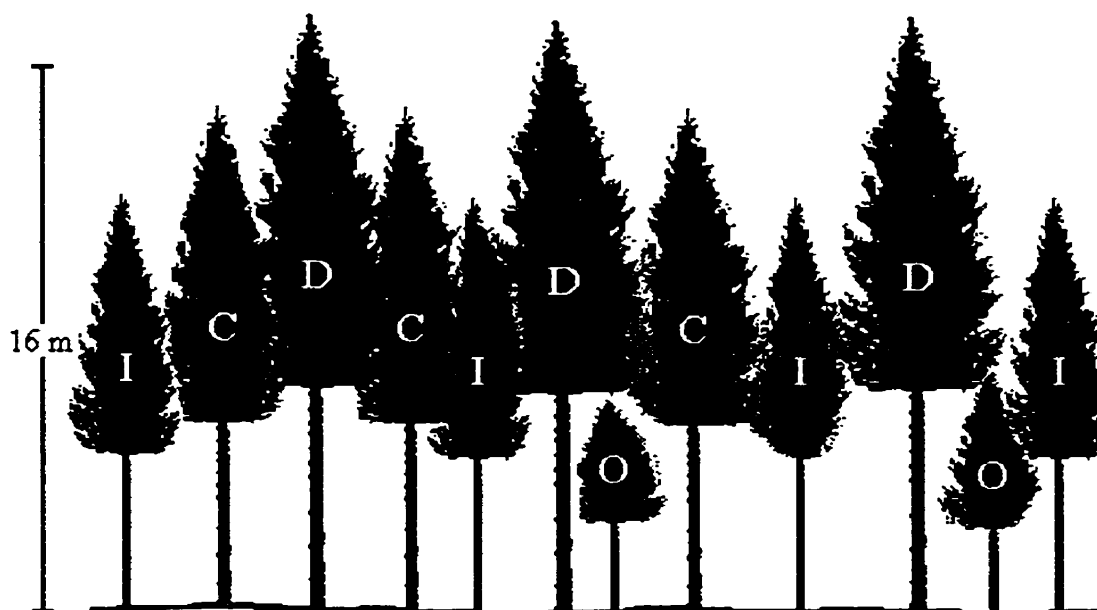


Figure 44: Position des arbres dans le couvert forestier (D: dominant, C: codominant, I : intermédiaire, O: opprimé)

Comme le démontre la figure 44, il est nécessaire de modéliser différemment l'emprise du vent sur la cime d'un arbre situé en bordure ou à l'intérieur d'un peuplement. De même, il est essentiel de tenir compte de la densité du couvert.

#### 4.1.1.1) Vitesse du vent

La vitesse du vent diminue à mesure que la rugosité de la surface au-dessus de laquelle l'air circule augmente (Buck 1964; Quine et al 1995). Par exemple, plus la vitesse du vent est élevée, plus l'atténuation due à la friction est élevée, il en ressort que le rapport vitesse dans le peuplement sur vitesse à l'extérieur du peuplement est plus faible lorsque la vitesse du vent est plus élevée (Fons 1940; Buck 1964; Moore 1977).

Sur un axe vertical, lorsque le terrain est découvert et que la topographie est uniforme, la vitesse moyenne du vent diminue rapidement dans les derniers 6 mètres au-dessus du sol, pour atteindre zéro à la surface (Buck 1964). Dans ce cas, la relation entre la vitesse moyenne du vent et la hauteur au-dessus du sol est définie par l'équation 15 (Monteith 1975) : lorsque la vitesse moyenne du vent ( $u$ ) est présentée sous forme graphique en fonction du logarithme de la hauteur ( $z$ ), la relation est linéaire et positive (Monteith 1975; Albini et Baughman 1979).

$$u(z) = A \ln z + B \quad [15]$$

$u(z)$  : Vitesse moyenne à la hauteur  $z$  (m/s)

$z$  : Hauteur de la mesure de la vitesse de vent (m)

$A$  : Constante indépendante de  $z$

$B$  : Constante indépendante de  $z$

Dans le premier des deux cas qui nous intéressent, c'est à dire les arbres en bordure de peuplement, le profil de vent peut être défini grâce à l'équation semi-logarithmique 15 (Hsi et Nath 1970; Raynor 1971; Peltola et Kellomäki 1993), qui implique que la vitesse de vent n'est pas uniforme sur toute la hauteur de l'arbre. Par contre, pour des raisons de simplification et en l'absence de profil de vent adapté au peuplement à l'étude, la vitesse de vent, dans le cadre de la présente étude, a été considérée uniforme sur la longueur de la cime. Bien que cette considération ne représente pas exactement la réalité en bordure du peuplement, elle n'en demeure pas moins une bonne approximation.

#### 4.1.1.2) Vent en bordure du peuplement

Les arbres situés en bordure d'un peuplement sont exposés à des vents dont la vitesse est substantiellement plus élevée que celle qui affecte les arbres situés à l'intérieur du peuplement (Raynor 1971; Stacey et al 1994; Quine et al 1995). En effet, la vitesse du vent en bordure du peuplement est presque aussi élevée qu'en terrain découvert (Raynor 1971). C'est pourquoi, dans le cadre de cette étude, aucun effet d'atténuation du vent n'a été incorporé pour calculer la vitesse du vent nécessaire au renversement d'un arbre exposé au vent, suite à la création d'une nouvelle bordure.

#### 4.1.1.3) Vent dans le peuplement

Le comportement du vent en un point donné à l'intérieur d'un peuplement est influencé par la distance entre ce point et la bordure du peuplement de même que par la densité du couvert forestier. Lorsque le vent pénètre dans un peuplement à partir d'une zone ouverte (route, coupe totale, champ), il retrouve un profil uniforme à une certaine distance de la lisière boisée, distance qui varie en fonction de la densité de celle-ci (Raynor 1971; Fritschen 1985; Peltola 1996). Au cours d'études passées, il a été évalué que l'effet de bordure se faisait sentir jusqu'à près de 60 m de la lisière boisée (2 à 3 hauteurs d'arbres) (Raynor 1971; Fritschen 1985) et parfois plus (Savill 1983).

Par ailleurs, une fois un profil uniforme retrouvé, la densité du couvert forestier est l'un des principaux facteurs influençant la vitesse du vent dans le peuplement, de sorte que dans un couvert dense, la vitesse du vent dans les cimes peut être réduite à 20% de celle observée au-dessus de la forêt, alors que lorsque le peuplement est plus ouvert, elle n'est réduite que de 50% (Lee 1978). Fons (1940) compare d'ailleurs le mouvement de l'air dans le couvert forestier à celui d'un fluide dans un tuyau rempli de matériel granulaire, comme le gravier ou le sable : le gravier réduit la vitesse d'écoulement de l'eau dans le tuyau et rend plus uniforme le débit au niveau de la section transversale. De façon similaire, les branches et le feuillage ont les deux effets suivants: soit 1) de réduire la vitesse du vent et 2) de rendre plus uniforme la distribution du vent dans la cime (Fons 1940).

Contrairement à ce qui se passe à l'extérieur du peuplement, le profil de vent à l'intérieur d'un peuplement est presque uniforme sur toute la longueur de la cime (Fons 1940; Reifsnyder 1955; Buck 1964; Hsi et Nath 1970; Raynor 1971, Albini, 1979). Il faut donc convertir la vitesse de vent dans le peuplement en vitesse de vent au-dessus du couvert, vitesse correspondant mieux à l'information disponible à partir des stations météorologiques.

La friction avec le couvert forestier est aussi responsable de la diminution de la vitesse du vent au niveau de la cime, mais cette friction donne naissance à de la turbulence, qui génère des rafales transmettant alors plus d'énergie au couvert forestier (Quine et al 1995). Il est donc

important de considérer que la vitesse critique nécessaire au renversement, à l'intérieur du peuplement, correspond à la vitesse maximale atteinte par les plus puissantes rafales.

#### **4.1.2) Impact des coupes partielles sur la stabilité du peuplement**

Comme il l'a été mentionné précédemment, il peut exister à l'intérieur des peuplements de grandes variations de vitesses de vent associées à la structure et à la densité du peuplement (Buck 1964; Fritschen 1985). De façon générale, les vitesses les plus élevées se rencontrent dans les peuplements les plus ouverts et les arbres qui s'y développent s'y sont généralement adaptés (Fritschen 1985; Quine et al 1995).

À la suite d'une coupe partielle, la vitesse du vent dans le couvert forestier augmente (Quine et al 1995; Peltola 1996), et les tiges restantes sont ainsi exposées à des conditions auxquelles elles ne sont pas adaptées (Quine et al 1995). De plus, les coupes partielles diminuent le contact entre les cimes, composante importante de la dissipation de l'énergie emmagasinée par le couvert forestier (Savill 1983; Mitchell 1995b; Quine et al 1995; Wood 1995; Peltola 1996). Ceci entraîne une augmentation du risque de renversement (Busby 1965; Savill 1983; Quine et al 1995; Peltola 1996). À mesure que l'arbre s'adapte aux nouvelles conditions de croissance, ce risque va en diminuant, mais cette adaptation peut prendre plusieurs années (Busby 1965; Savill 1983; Quine et al 1995). Ces considérations peuvent par contre être contrées par des coupes partielles débutées en jeune âge qui permettent le maintien d'un rapport  $H/D$  faible, ce qui améliore la résistance au renversement du peuplement (Savill 1983).

#### **4.2) MÉTHODOLOGIE**

La méthodologie utilisée pour modéliser l'emprise du vent sur la cime du sapin baumier et de l'épinette blanche a été élaborée par Smith et al (1987) qui ont réalisé des travaux de recherche sur la stabilité de l'épinette noire dans la ceinture argileuse du nord de l'Ontario. Pour la présente étude, certains ajustements ont cependant été réalisés afin de tenir compte des données récoltées et des caractéristiques propres à chaque espèce.

### 4.2.1) Volume et densité de cime

Le sapin baumier et l'épinette blanche sont considérés comme deux espèces ayant un port pouvant être associé à une série de cylindres. La force agissant sur la cime de ces arbres peut donc être estimée en utilisant la formule de force s'appliquant à des corps cylindriques.

#### 4.2.1.1) Considérations mathématiques

La première étape consiste à calculer le volume ainsi que la densité de chaque section de cime. Afin de déterminer le volume de la cime, la formule de Smalian peut être utilisée (équation 16), où la cime est considérée comme un tronc de parabolöide. C'est en utilisant deux mesures de rayons,  $X_i$  (m) et  $Y_i$  (m), situés à 90° l'une de l'autre, à la base de chaque section de cime, qu'il est possible de déterminer le diamètre moyen à chacune des extrémités de la section de cime (Wile 1964).

$$V_i = \pi L_i (d_i^2 + d_j^2) / 80000 \quad [16]$$

$V_i$  : Volume de la section  $i$  (m<sup>3</sup>)

$L_i$  : Longueur du tronçon  $i$  (m)

$d_i$  : Diamètre moyen de la cime à la base du tronçon  $i$  (cm)

$d_j$  : Diamètre moyen de la cime à la base du tronçon  $j$  (cm)

La seconde étape du calcul consiste à évaluer la densité de la section de cime ( $DSC$ ) en divisant le poids vert de la section de cime ( $W_{b(i)}$ ) par le volume de cette section ( $V_i$ ), tel que présenté à l'équation 17.

$$DSC_i = W_{b(i)} / V_i \quad [17]$$

$DSC_i$  : Densité de la section de cime  $i$  (kg/m<sup>3</sup>)

$W_{b(i)}$  : Poids vert des branches de la section  $i$  (kg)

$V_i$  : Volume de la section  $i$  (m<sup>3</sup>)

Une fois le volume et la densité de chaque section de cime déterminés, le diamètre d'un

cylindre poreux, de même longueur et de même volume que la section de cime, est calculé à l'aide de l'équation 18.

$$D_i = (4V_i / \pi L_i)^{1/2} \quad [18]$$

$D_i$  : Diamètre du cylindre poreux  $i$  (m)

$V_i$  : Volume de la section de cime  $i$  (m<sup>3</sup>)

$L_i$  : Longueur du tronçon  $i$  (m)

Il ne reste plus qu'à convertir chaque section de cylindre poreux en son équivalent solide, sur la base de la densité foliaire, c'est à dire en fonction de la densité de la section de cime ( $DSC$ ). Si  $D_e$  constitue le diamètre de l'équivalent solide, alors le rapport  $D_e / D$  devrait être fonction de la densité foliaire. La relation mathématique correspondante la plus simple est linéaire, et c'est cette relation (19) qui a été utilisée pour calculer  $D_e$ :

$$D_{e(i)} = D_i \cdot DSC_i / 5,5 \quad [19]$$

$D_{e(i)}$  : Diamètre du cylindre solide  $i$  (m)

$D_i$  : Diamètre du cylindre poreux  $i$  (m)

$DSC_i$  : Densité de la section de cime  $i$  (kg/m<sup>3</sup>)

La constante 1 / 5,5 a été introduite dans l'équation 19, car une section de cime d'une densité de 5 à 6 kg/m<sup>3</sup> possède un feuillage si dense qu'il est imperméable au vent (Smith et al 1987). Par conséquent, lorsque la densité de la section de cime ( $DSC$ ) est égale à 5,5 kg/m<sup>3</sup> dans l'équation 19,  $D_e / D$  égale 1, et la section de cime est considérée solide. La formule est donc conséquente avec la résistance connue des corps perméables, c'est à dire que lorsque les pores d'un corps sont assez fins, la résistance offerte par ce corps est comparable à celle offerte par un corps solide de même dimension. Pour des valeurs de  $DSC$  plus grandes que 5,5 kg/m<sup>3</sup>, la valeur associée à  $D_e$  est celle de  $D$ . La figure 45 illustre comment l'épinette blanche et le sapin baumier sont transformés en une série de troncs de paraboloides, de cylindres perméables et de cylindres imperméables.

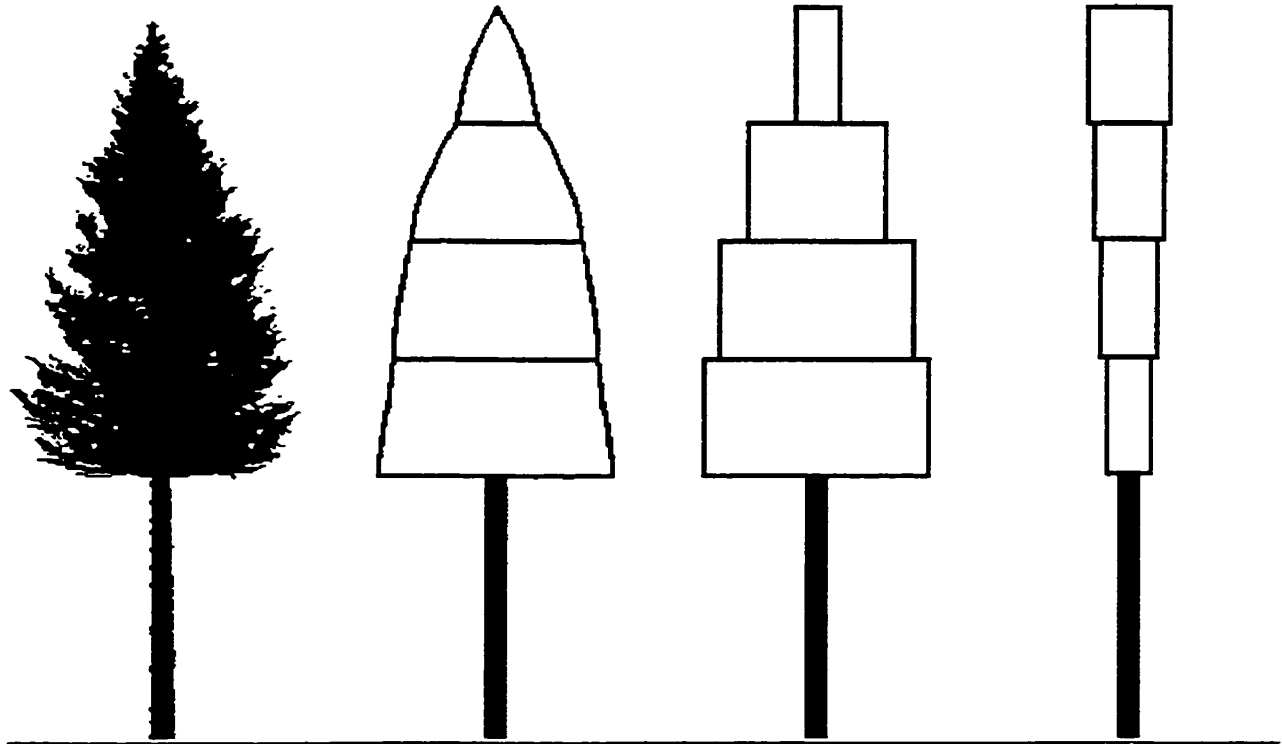


Figure 45: Transformation de la cime conique en tronc de paraboloides, puis en cylindres perméables et finalement en cylindres imperméables  
(Adapté de Smith et al (1987))

#### 4.2.1.2) Adaptation du modèle

Dans le cadre de cette étude, l'équation 19 diffère de celle utilisé par Smith et al (1987), car ces derniers ajoutaient une autre constante,  $1 / 12$ , qui permettait de tenir compte de la tige et des branches des sections de cimes possédant un feuillage minimal. La provenance de cette constante n'est pas mentionnée et il est difficile d'évaluer si  $1 / 12$  représente bel et bien l'impact réel du tronc et des branches dans les portions de cime qui possèdent un feuillage minimal. Nous avons donc exclu cette constante de l'équation.

En ce qui concerne la portion de la tige située sous la cime, la valeur associée à  $D_e$  pour cette étude est celle de  $D$  en raison de l'imperméabilité du tronc. Le diamètre d'un cylindre, dont le volume est semblable à la portion de la tige non comprise dans la cime, a été calculé à l'aide de la formule 18. Dans cette formule, le volume est obtenu grâce à la masse de la section de la



tige et à la densité basale de l'espèce (équation 20) et non à l'aide de la formule de Smalian, en raison d'un manque de données.

$$D_b = M_o / V_s \quad [20]$$

$D_b$  : Densité basale (kg/m<sup>3</sup>)

$M_o$  : Masse anhydre (kg)

$V_s$  : Volume à saturation ou volume vert (m<sup>3</sup>)

Lors de l'expérience, la masse verte ou masse humide de la tige ( $M_h$ ) a été déterminée à l'aide de la cellule de charge. Comme aucun échantillon n'a été pris pour déterminer le pourcentage d'humidité du bois, la teneur moyenne en humidité de l'espèce (55% pour l'épinette blanche et 118% pour le sapin baumier) (Cech et Pfaff 1980), a été utilisée pour déterminer la masse anhydre ( $M_o$ ) (équation 21):

$$M_o = M_h / (1 + H) \quad [21]$$

$M_o$  : Masse anhydre (kg)

$M_h$  : Masse humide (kg)

$H$  : Pourcentage d'humidité (%)

Une fois la masse anhydre calculée ( $M_o$ ), la densité basale de l'espèce ( $D_b$ ) (354 kg/m<sup>3</sup> pour l'épinette blanche et 335 kg/m<sup>3</sup> pour le sapin baumier) (Jessome 1977) a été utilisée pour déterminer le volume à saturation ( $V_s$ ) (équation 20).

La méthode utilisée dans le cadre de cette étude pour déterminer le diamètre du cylindre associé au tronc diffère de celle élaborée par Smith et al (1987) de deux façons. Premièrement, l'absence de données concernant le diamètre à différents niveaux sur la tige a forcé l'estimation du volume à l'aide de la masse des tiges et non à l'aide de la formule de Smalian. Deuxièmement, Smith et al (1987) tenaient compte de l'importance des branches mortes et des chicots de branches, mesures qui n'ont pas été comprises dans les mesures de cime. Afin de tenir compte de la résistance supplémentaire liée à ces branches, les auteurs avaient augmenté

de 10% le diamètre du tronc, ce qui implique que  $D_e = 1,10 D$ . Dans le cadre de la présente étude, les branches mortes ont été jugés non significatives et n'ont pas été considérées. La relation entre les diamètres de tronc est la suivante:  $D_e = D$ .

L'arbre étant ainsi transformé en une structure imperméable, il est possible de calculer la force qui lui est transmise par le vent en utilisant des formules connues. La force agissant sur chaque cylindre solide peut être déterminée en utilisant l'équation 22 (Melaragno 1982; Fox et McDonald 1992), où l'indice  $i$  représente le numéro du cylindre tel qu'illustré à la figure 46.

$$F_i = 0,5 \rho C_D (U_{c(i)})^2 A_i \quad [22]$$

$F_i$  : Force appliquée au cylindre  $i$  (N)

$\rho$  : Densité de l'air ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_D$  : Coefficient de résistance

$U_{c(i)}$  : Vitesse du vent dans le peuplement au niveau du cylindre  $i$  (m/s)

$A_i$  : Surface frontale du cylindre  $i$  ( $\text{m}^2$ )

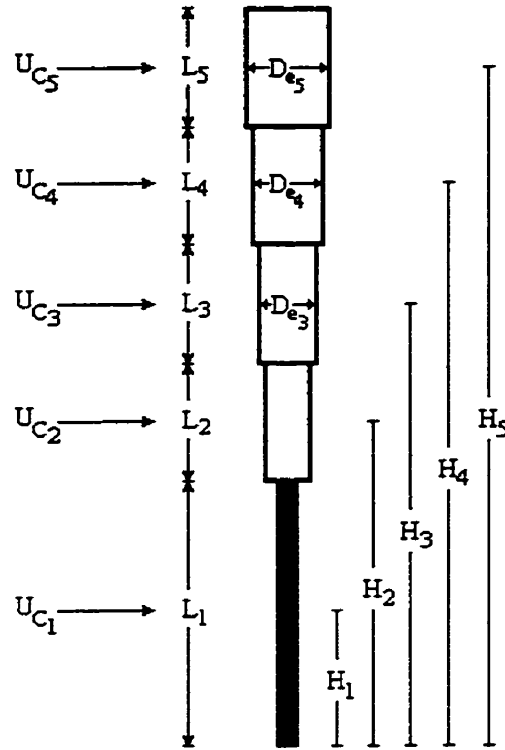


Figure 46. Vitesses de vent ( $U_{c(i)}$ ) et hauteurs des centres de gravité ( $H_i$ ) des cylindres de diamètre  $D_{e(i)}$  et de longueur  $L_i$  représentant les différentes sections de l'arbre. Tiré de Smith (1987).

La densité de l'air ( $\rho$ ) utilisée dans l'équation 22 est de  $1,23 \text{ kg/m}^3$  et correspond à une pression de 1000 mb et à une température de  $10^\circ\text{C}$  (Lee 1978). Le coefficient de résistance ( $C_D$ ) de 1,16, correspond aux dimensions des cylindres ainsi qu'aux vitesses de vent utilisées pour cette étude (Fox et McDonald 1992). La surface frontale du cylindre ( $A_i$ ) est obtenue en multipliant le diamètre du cylindre solide ( $D_{e(i)}$ ) par la longueur du cylindre ( $L_i$ ).

Dans cette étude,  $U_{c(1)} = U_{c(2)} = \dots = U_{c(i)}$ , car le profil de vent dans le peuplement est considéré uniforme. Toutefois, si le profil de vent n'avait pas été uniforme, mais connu, il aurait été possible de substituer les valeurs de  $U_{c(i)}$  dans la formule 22.

La force qui est appliquée au cylindre agit à son centre de gravité et ce dernier est situé à mi-hauteur du cylindre. Sachant que le moment induit par le vent à la base de l'arbre est le produit

de la force ( $F_i$ ) et de la hauteur du centre de gravité ( $H_i$ ), le moment total dû au vent  $M_v$  (Nm) est obtenu en faisant la somme des moments des  $n$  cylindres:

$$M_v = \sum(F_i H_i) \quad [23]$$

$M_v$  : Moment total dû au vent (Nm)

$F_i$  : Force appliquée au cylindre  $i$  (N)

$H_i$  : Hauteur du centre de gravité du cylindre  $i$  (m)

La figure 46 présente les vitesses de vent ( $U_{c(i)}$ ) et les hauteurs des centres de gravité ( $H_i$ ) utilisés pour le calcul du moment total dû au vent (équation 23) sur la série de cylindres de diamètre  $D_{e(i)}$  et de longueur  $L_i$ .

L'équation 24 est obtenue en remplaçant l'équation 22 dans l'équation 23. Il est alors possible de déterminer la vitesse critique  $U_{cMax}$  (m/s), correspondant à la vitesse de vent nécessaire pour induire un moment de force équivalent au moment maximal induit par le vent  $M_{vMax}$  (Nm). Dans le cadre de cette étude, le moment maximal induit par le vent ( $M_{vMax}$ ) correspond au moment maximal induit par la traction ( $M_t$ ), qui a été préalablement déterminé lors de l'étude de treillage.

$$U_{cMax} = (M_{vMax} / 0,5 \rho C_D \sum(A_i H_i))^{0,5} \quad [24]$$

$U_{cMax}$  : Vitesse critique du vent dans le peuplement (m/s)

$M_{vMax}$  : Moment maximal induit par le vent (Nm)

$\rho$  : Densité de l'air (kg/m<sup>3</sup>)

$C_D$  : Coefficient de résistance du cylindre dans le vent

$A_i$  : Surface frontale du cylindre  $i$  (m<sup>2</sup>)

$H_i$  : Hauteur du centre de gravité du cylindre  $i$  (m)

La vitesse critique constitue la vitesse maximale que peut supporter un arbre avant d'être renversé ou brisé par le vent. Cette vitesse maximale est associée aux rafales, où la vitesse du

vent peut être jusqu'à 50% plus élevée que la vitesse moyenne enregistrée pour l'heure (Busby 1965; Oliver et Mayhead 1974; Smith et al 1987). Oliver et Mayhead (1974) ont déterminé que les rafales susceptibles d'affecter les arbres, pour une durée de 0,5 à 5 secondes, avaient probablement des vitesses de 30 à 40% plus élevées que la moyenne de cinq minutes enregistrée par les anémomètres lors de leur étude. Quine et al (1995) rapportent par ailleurs que les rafales sont la principale cause de dommages en forêt et que la force induite par les plus puissantes rafales atteint jusqu'à dix fois celle du vent moyen. Il importe donc d'inclure un facteur de rafale, afin de faire le lien avec les mesures de vitesse moyenne du vent.

Afin de tenir compte de la force des rafales de vent, un facteur de rafale doit être appliqué au moment maximal afin de trouver le moment moyen correspondant au vent moyen. Le facteur de rafale ( $G$ ) a été développé par Gardiner et al (2000) et est le résultat de la division du moment maximum ( $MaxBM_N$ ) par le moment moyen ( $MeanBM_N$ ) calculé pour chaque tige (équations 25 et 26). Dans les équations 25 et 26,  $x$  est remplacé par  $5h$ , afin d'éliminer l'effet de bordure et ainsi de calculer un facteur de rafale applicable à l'intérieur des peuplements. Le rapport de l'espacement sur la hauteur devrait se situer entre 0,075 et 0,45.

$$MeanBM_N = (0,68(s/h) - 0,0385) + (-0,68(s/h) + 0,4785)(1,7239(s/h) + 0,0316)^{x/h} \quad [25]$$

$$MaxBM_N = (2,7193(s/h) - 0,061) + (-1,273(s/h) + 0,9701)(1,1127(s/h) + 0,0311)^{x/h} \quad [26]$$

$$G = MaxBM_N / MeanBM_N \quad [27]$$

$G$  : Facteur de rafale

$MaxBM_N$  : Moment maximal

$MeanBM_N$  : Moment moyen

$s$  : Espacement entre les tiges marchandes (m)  $(10000m^2 / Nb \text{ ti mar./ha})^{0,5}$

$h$  : Hauteur de la tige (m)

$x$  : Distance de la bordure de la forêt (m)

Par la suite, un facteur de rafale moyen ( $G_{Moy}$ ) est déterminé pour chaque essence et sur chaque site. Il est alors associé au moment maximal induit par le vent ( $M_{vMax}$ ), afin d'obtenir le moment induit par le vent moyen ( $M_{vMoy}$ ), grâce à l'équation 28.

$$M_{vMoy} = M_{vMax} / G_{Moy} \quad [28]$$

- $M_{vMoy}$  : Moment moyen induit par le vent (Nm)
- $M_{vMax}$  : Moment maximal induit par le vent (Nm)
- $G_{Moy}$  : Facteur de rafale moyen

Il est alors possible de remplacer  $M_{vMax}$  par  $M_{vMoy}$  dans l'équation 24 et ainsi obtenir la vitesse moyenne du vent ( $U_{cMoy}$ ) dont les rafales atteignent la vitesse critique ( $U_{cMax}$ ) (équation 29).

$$U_{cMax} = (M_{vMoy} / 0,5 \rho C_D \sum(A_i H_i))^{0,5} \quad [29]$$

- $U_{cMoy}$  : Vitesse moyenne du vent dans le peuplement (m/s)
- $M_{vMoy}$  : Moment moyen dû au vent (Nm)
- $\rho$  : Densité de l'air (kg/m<sup>3</sup>)
- $C_D$  : Coefficient de résistance du cylindre dans le vent
- $A_i$  : Surface frontale du cylindre  $i$  (m<sup>2</sup>)
- $H_i$  : Hauteur du centre de gravité du cylindre  $i$  (m)

### 4.3) RÉSULTATS

Lors de la prise de données sur le terrain, les cinq premières tiges échantillonnées sur le site 4 n'ont pas été mesurées et pesées adéquatement. Les rayons de cime ( $X_i$  et  $Y_i$ ) n'ont pas été mesurés, rendant impossible le calcul du volume de la cime. De plus, comme le poids des branches n'avait pas été mesuré séparément du poids du tronc, il a été impossible de déterminer la densité de la cime. Ces tiges ont donc été éliminées de l'échantillonnage.

### 4.3.1) Caractéristiques de la cime

Les mesures réalisées sur les arbres treuillés ont permis de déterminer le volume et le poids des cimes des épinettes blanches et des sapins baumiers. Ceci permet la comparaison des cimes de ces deux essences et la détermination des relations existant entre les caractéristiques de la cime et la hauteur totale, le *DHP* et le rapport *H/D*. Comme les résultats du treillage sont utilisés pour modéliser la résistance du sapin baumier à l'aide du logiciel *ForestGales* (Ruel et al 2000) et que les variables servant à caractériser la cime dans ce modèle sont la longueur et le diamètre de la cime vivante, ces deux variables ont aussi été étudiées.

À l'aide des rayons de cime, de la hauteur de la cime vivante, de la hauteur totale et du poids des branches mesurés sur le terrain, il est possible de déterminer le volume, le poids, la longueur et le diamètre de la cime des arbres qui ont été treuillés. Les caractéristiques moyennes des cimes des épinettes blanches et des sapins baumiers treuillés sont présentées au tableau 18 et 19 respectivement.

Tableau 18: Caractéristiques moyennes des cimes des tiges d'épinette blanches treuillées

Site	Volume (m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Longueur (m)	Diamètre (m)
1	61,406	49,896	8,820	3,977
2	19,354	34,650	7,361	2,061
3	36,506	38,487	7,606	2,970
4	35,212	55,272	7,810	3,184
Total	37,257	43,704	7,869	2,996

Tableau 19: Caractéristiques moyennes des cimes des tiges de sapin baumier treuillées

Site	Volume (m <sup>3</sup> )	Poids (kg)	Longueur (m)	Diamètre (m)
1	40,591	59,724	8,650	3,131
2	24,050	29,278	7,190	2,316
3	22,305	27,216	6,919	2,517
4	46,813	82,770	9,580	3,545
Total	31,740	45,624	7,597	2,790

Pour comparer les caractéristiques des cimes des épinettes blanches et des sapins baumiers, des régressions du volume, du poids, de la longueur et du diamètre des cimes ont été réalisées avec la hauteur totale de l'arbre ( $H_{tot}$ ), le  $DHP$  et le rapport  $H/D$ . Ces équations de régression ont par la suite été comparées à l'aide du test de Chow. Les tableaux 20 à 23 présentent les coefficients des équations de régression, sous forme linéaire ( $y = \beta_0 + \beta_1x$ ) ou sous forme polynomiale ( $y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2$ ),  $\beta_0$  représentant l'ordonnée à l'origine et  $\beta_1$  la pente ou le coefficient d'effet linéaire,  $\beta_2$  le coefficient d'effet quadratique et  $R^2a$  le coefficient de détermination ajusté. Les valeurs du  $F$  calculé à l'aide du test de Chow ( $F_{Chow}$ ) sont aussi présentées dans ce tableau.

Tableau 20: Caractéristiques des régressions impliquant le volume de la cime et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche et le sapin baumier

Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2a$	$F_{Chow}$
Épinette blanche					
$H_{tot}$ (m)	-40,142	5,439*		0,075	0,965
$DHP$ (m)	-28,303	351,750**		0,299	0,250
$H/D$	553,828**	-11,686**	0,064**	0,471	-0,561
Sapin baumier					
$H_{tot}$ (m)	-57,799**	6,243**		0,402	
$DHP$ (m)	-19,576*	295,484**		0,545	
$H/D$	129,992**	-1,152**		0,462	

\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,05$

\*\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,01$



L'information présentée au tableau 20 permet de constater que, chez l'épinette blanche, les régressions du volume de la cime en fonction des différentes variables sont significatives. Toutefois, la relation avec la hauteur totale n'explique qu'une faible partie de la variation du volume de la cime dans la population (7,5%). De plus, la relation avec le rapport  $H/D$  possède un effet quadratique, alors que des effets linéaires sont observés chez les autres variables et chez le sapin baumier.

Les régressions concernant le sapin baumier sont hautement significatives et, comparativement à l'épinette blanche, les équations linéaires expliquent une plus grande partie de la variation du volume de la cime dans la population.

Il n'existe pas de différences significatives entre les équations de régression du volume de la cime chez l'épinette blanche et le sapin baumier, tel que démontré par le test de Chow (tableau 20).

Le tableau 21 présente les résultats des régressions impliquant le poids de la cime et les différentes variables indépendantes chez l'épinette blanche et le sapin baumier.

Tableau 21: Caractéristiques des régressions impliquant le poids de la cime et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche et le sapin baumier

Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2a$	$F_{Chow}$
Épinette blanche					
$H_{tot}$ (m)	-120,184**	11,516**		0,506	1,278
$DHP$ (m)	-48,976**	497,260**		0,740	3,749*
$H/D$	390,961**	-7,140**	0,034*	0,640	16,779**
Sapin baumier					
$H_{tot}$ (m)	177,954	-30,777	1,477*	0,723	
$DHP$ (m)	35,223	-424,539	2606,548*	0,854	
$H/D$	915,510**	-18,886**	0,100**	0,751	

\* Coefficient significatif ou équations significativement différentes au seuil  $\alpha = 0,05$

\*\* Coefficient significatif ou équations significativement différentes au seuil  $\alpha = 0,01$

Les équations présentées au tableau 21 permettent de constater la présence d'effets linéaires et quadratiques significatifs dans les relations impliquant le poids de la cime et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche. Pour le sapin baumier, les trois équations présentent quant à elles des effets quadratiques significatifs. Parmi les variables indépendantes utilisées lors des régressions impliquant le poids de la cime, le *DHP* se démarque des deux autres en expliquant une plus grande partie de la variance de la population, tant chez l'épinette blanche que chez le sapin baumier. Les figures 47 et 48 illustrent les régressions du poids de la cime en fonction du *DHP* et du rapport *H/D*, qui présentent des relations significativement différentes pour l'épinette blanche et le sapin baumier.

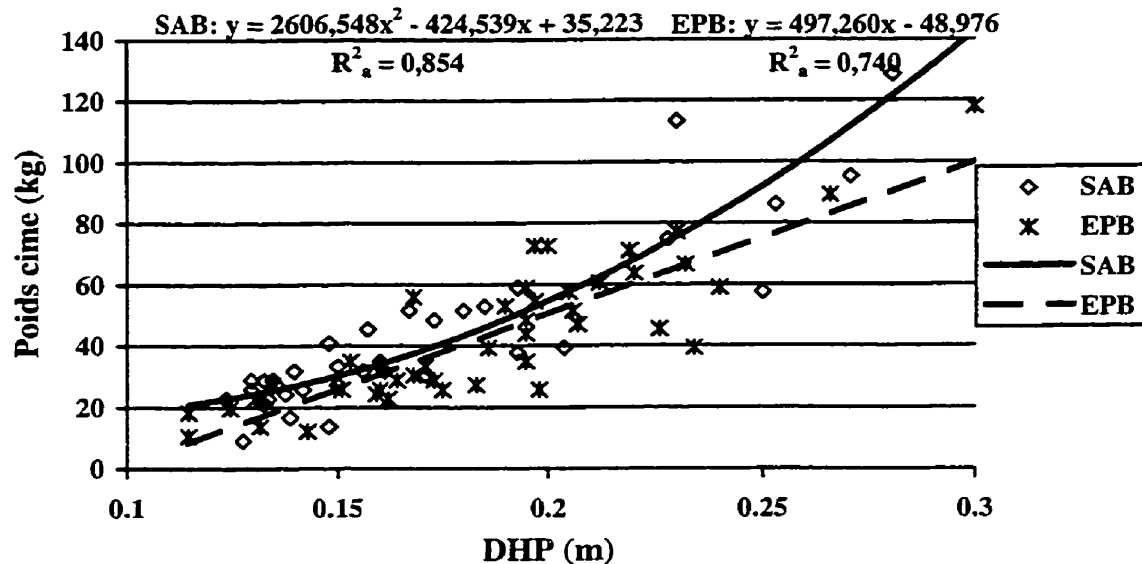


Figure 47: Comparaison des droites de régression du poids de la cime en fonction du *DHP* pour l'épinette blanche et le sapin baumier

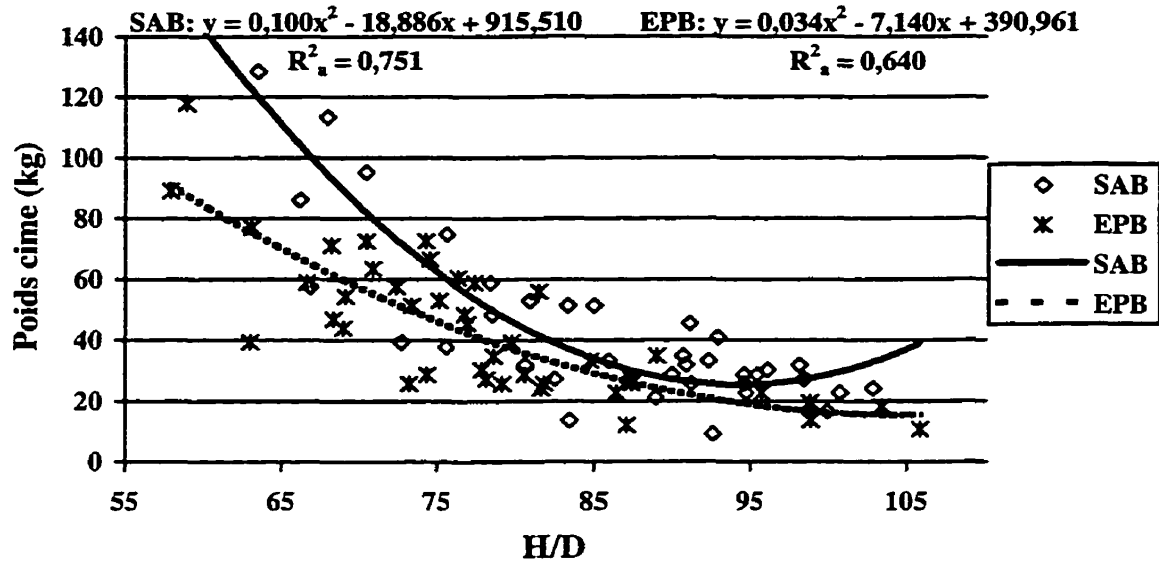


Figure 48: Comparaison des droites de régression du poids de la cime en fonction du  $H/D$  pour l'épinette blanche et le sapin baumier

La longueur de la cime a été mise en relation avec la hauteur totale, le  $DHP$  et le rapport  $H/D$  pour l'épinette blanche et le sapin baumier, les résultats sont présentés au tableau 22

Tableau 22: Caractéristiques des régressions impliquant la longueur de la cime et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche et le sapin baumier

Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2_a$	$F_{Chow}$
Épinette blanche					
$H_{tot}$ (m)	2,742	0,360*		0,100	1,122
$DHP$ (m)	3,989**	20,818**		0,299	1,839
$H/D$	30,508**	-0,495**	2,57E-3*	0,392	3,339*
Sapin baumier					
$H_{tot}$ (m)	-1,168	0,637**		0,482	
$DHP$ (m)	3,066**	28,232**		0,568	
$H/D$	17,183**	-0,108**		0,463	

\* Coefficient significatif ou équations significativement différentes au seuil  $\alpha = 0,05$

\*\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,01$

Parmi les équations présentées au tableau 22, seule celle impliquant la longueur de la cime et le rapport  $H/D$  pour l'épinette blanche présente un effet quadratique significatif. Les autres

équations présentent seulement des effets linéaires significatifs. Les relations du sapin baumier expliquent une plus grande partie de la variance de la population que celles de l'épinette blanche. Il est à noter que les équations impliquant la longueur de la cime et le rapport  $H/D$  sont différentes au seuil  $\alpha = 0,05$  (figure 49).

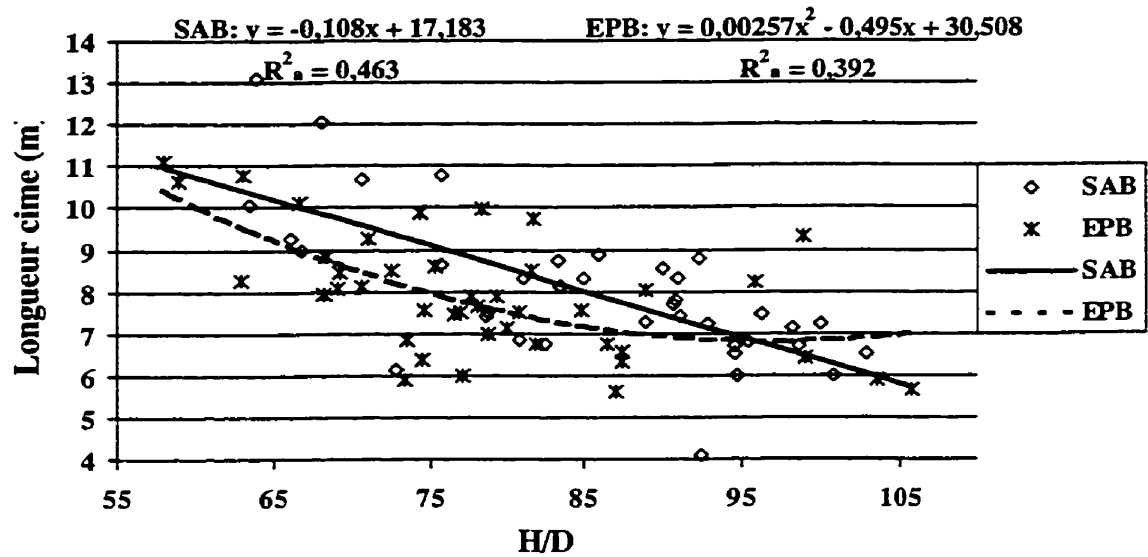


Figure 49: Comparaison des droites de régression de la longueur de la cime en fonction du  $H/D$  pour l'épinette blanche et le sapin baumier

Le tableau 23 présente les caractéristiques des régressions impliquant le diamètre de la cime pour le sapin baumier et l'épinette blanche.

Tableau 23: Caractéristiques des régressions impliquant le diamètre de la cime et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche et le sapin baumier

Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2a$	$F_{Chow}$
Épinette blanche					
$H_{tot}$ (m)	0,043	0,208		0,050	-
$DHP$ (m)	0,765	11,971**		0,167	0,181
$H/D$	24,628**	-0,504**	2,85E-3**	0,330	1,153
Sapin baumier					
$H_{tot}$ (m)	-0,426	0,225**		0,309	
$DHP$ (m)	1,102**	9,746**		0,350	
$H/D$	5,921**	-0,037**		0,273	

\*\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,01$

À partir du tableau 23, il est possible d'observer l'absence de relation linéaire significative entre le diamètre de la cime et la hauteur totale chez l'épinette blanche, alors que les autres relations sont hautement significatives chez cette essence. Elles n'expliquent que de 16,7 à 35% de la variance de la population. La relation entre le diamètre de la cime et le rapport  $H/D$  chez l'épinette blanche présente un effet quadratique hautement significatif, mais aucune relation n'est significativement différente entre les essences étudiées.

#### 4.3.2) Vitesse critique en bordure de peuplement

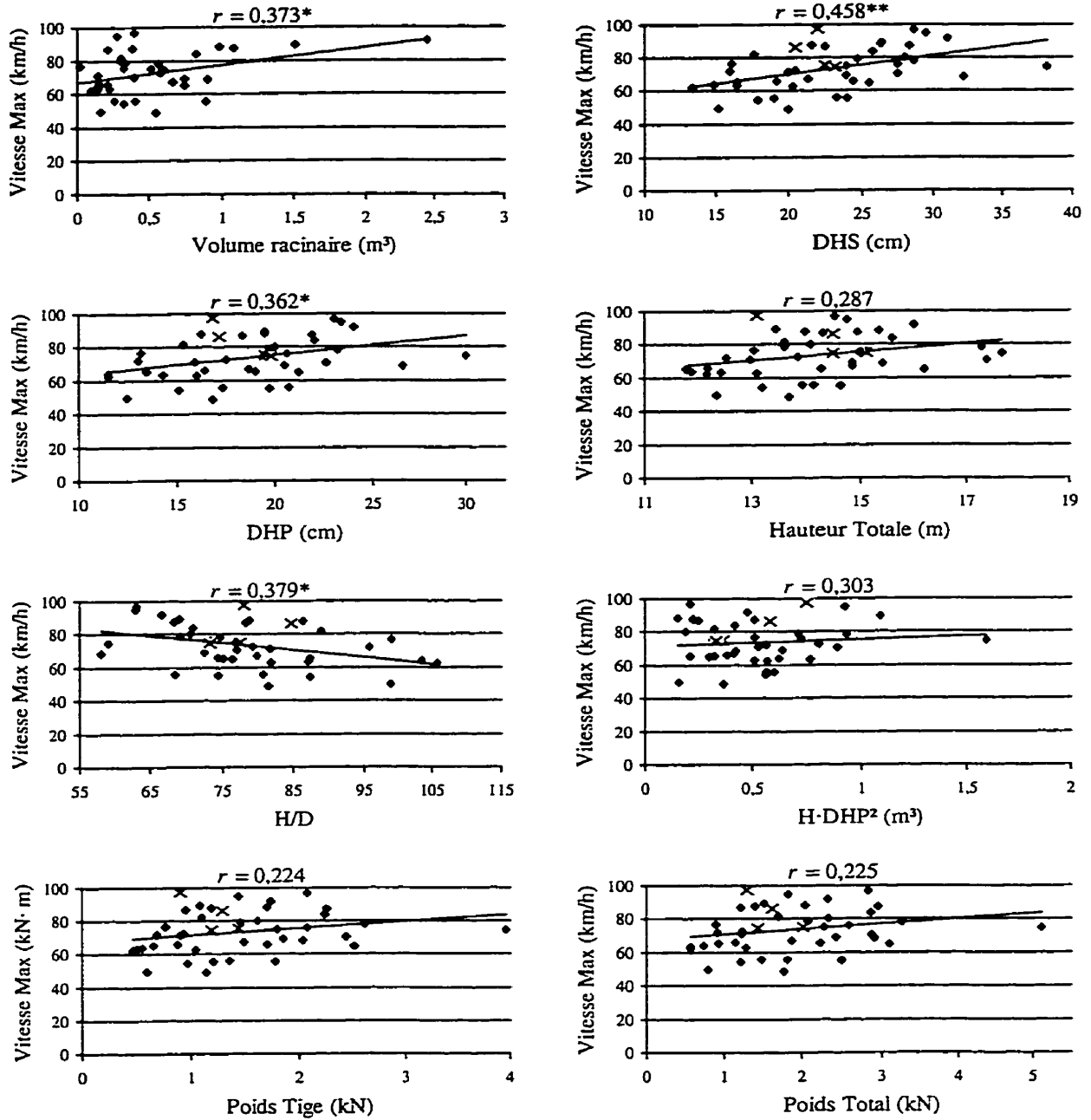
Comme il a été expliqué au chapitre 3, dans le cadre de cette étude de treuillage, le moment critique ( $M_c$ ) mesuré était constitué du moment engendré par la traction dans le câble ( $M_t$ ) et du moment induit par la gravité ( $M_g$ ). À partir de cette information, le moment de force maximal induit par le vent ( $M_v$ ) peut être calculé à partir du moment critique mesuré lors du treuillage, duquel est soustrait le moment induit par la gravité.

Il est ainsi possible de déterminer la vitesse de vent nécessaire à l'atteinte de la force maximale induite par le vent ( $U_{cMax}$ ) qui corresponde à la vitesse d'une rafale dont la force est suffisante pour renverser un arbre dans des conditions de bordure de peuplement nouvellement formée. Le tableau 24 présente les moyennes et les écarts-type des vitesses maximales calculées, pour chaque site, pour l'épinette blanche et le sapin baumier.

Tableau 24: Moyenne et écart-type des vitesses maximales ( $U_{cMax}$ ) par site pour l'épinette blanche et le sapin baumier

Site	$U_{cMax}$ (km/h)	
	Épinette blanche	Sapin baumier
1	83,1 (11,7)	62,9 (6,9)
2	66,5 (10,5)	59,3 (6,9)
3	68,1 (10,2)	60,6 (6,5)
4	78,9 (12,0)	70,0 (6,5)
Total	73,5 (12,8)	57,4 (8,1)

Les figures 50 et 51 présentent le comportement des tiges rompues et des tiges renversées pour l'épinette blanche et le sapin baumier. Il est possible d'observer que les tiges rompues se comportent de façon similaire aux tiges renversées, de plus il est possible d'observer l'absence de forte relation linéaire ( $r > 0,70$ ) entre la vitesse maximale ( $U_{cMax}$ ) et les variables indépendantes liées au système racinaire et à la taille de l'arbre.



(\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,05$ )

\*\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,01$ )

Figure 50: Comportement des tiges rompues (x), des tiges renversées (♦) et valeur du coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ) pour l'épinette blanche

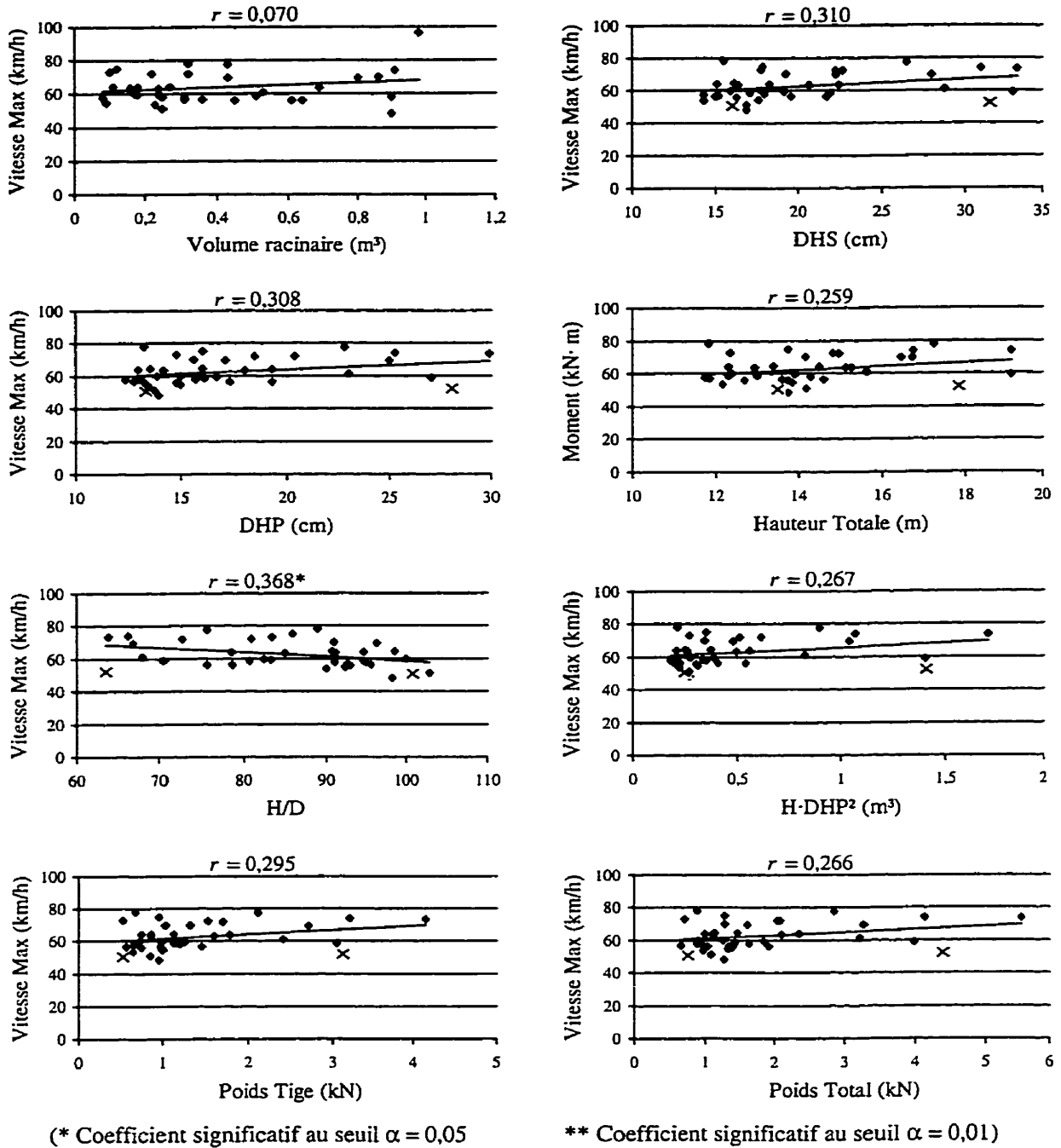


Figure 51: Comportement des tiges rompues (×), des tiges renversées (♦) et valeur du coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ) pour le sapin baumier

Des régressions linéaires simples ont été réalisées entre la vitesse maximale ( $U_{cMax}$ ) et les différentes variables indépendantes ( $V_{rac}$ ,  $DHS$ ,  $DHP$ ,  $H_{tot}$ ,  $H/D$ ,  $H \cdot DHP^2$ ,  $W_{tige}$  et  $W$ ). Les tableaux 25 et 26 présentent les équations de régression linéaire simple significatives, pour



l'épinette blanche et le sapin baumier respectivement, sous la forme:  $y = \beta_0 + \beta_1 x$ . S'y retrouvent l'ordonnée à l'origine ( $\beta_0$ ), la pente ( $\beta_1$ ), le coefficient de détermination ajusté ( $R^2a$ ) ainsi que le résultat de la comparaison des équations pour les deux essences, soit la valeur de  $F$  calculée à l'aide du test de Chow ( $F_{Chow}$ ).

Tableau 25: Caractéristiques des régressions impliquant la vitesse maximale ( $U_{cMax}$ ) et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche

Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$R^2a$	$F_{Chow}$
DHS (cm)	48,113**	1,107**	0,190	-
DHP (cm)	51,930**	1,159*	0,109	-
H/D	107,766**	-0,436*	0,122	6,661**

\* Coefficient significatif ou équations significativement différentes au seuil  $\alpha = 0,05$

\*\* Coefficient significatif ou équations significativement différentes au seuil  $\alpha = 0,01$

Tableau 26: Caractéristiques des régressions impliquant la vitesse maximale ( $U_{cMax}$ ) et les différentes variables indépendantes pour le sapin baumier

Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$R^2a$	$F_{Chow}$
H/D	85,117**	-0,265*	0,110	6,661**

\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,05$

\*\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,01$

À partir des tableaux 25 et 26, il est possible de constater, que bien que les régressions soient significatives, elles ne s'ajustent pas bien aux populations d'épinette blanche et de sapin baumier ( $R^2a$  variant entre 0,109 et 0,190). Toutefois, le résultat du test de Chow démontre que les équations sont significativement différentes pour les deux essences à l'étude. La figure 52 présente la comparaison des relations linéaires impliquant la vitesse critique ( $U_{cMax}$ ) pour l'épinette blanche et le sapin baumier.

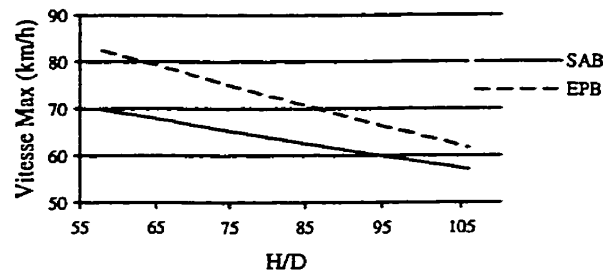


Figure 52: Comparaison des relations linéaires impliquant la vitesse critique ( $U_{cMax}$ ) pour l'épinette blanche et le sapin baumier

### 4.3.3) Vitesse critique à l'intérieur du peuplement

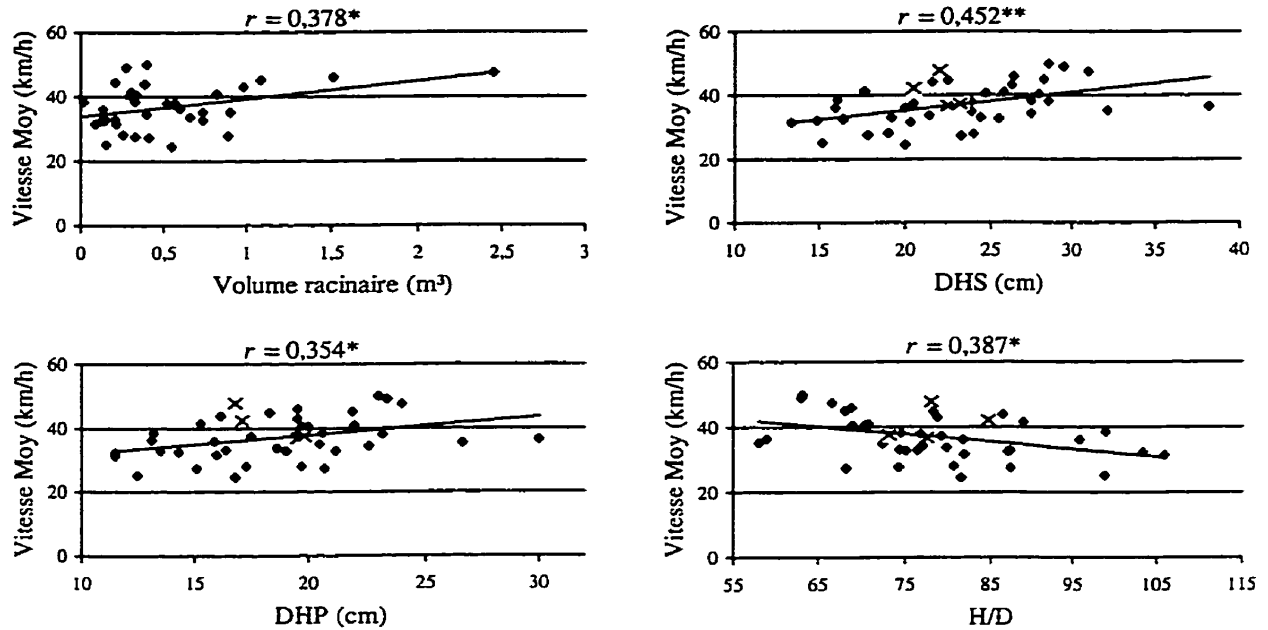
Le calcul de la vitesse maximale ( $U_{cMax}$ ) induite par le vent en bordure du peuplement permet d'évaluer la vitesse moyenne du vent à l'intérieur du couvert forestier ( $U_{cMoy}$ ) générant une rafale transmettant à l'arbre assez d'énergie pour le renverser. Le tableau 27 présente les moyennes et les écarts-types, pour chaque site, des vitesses moyennes à l'intérieur du peuplement ( $U_{cMoy}$ ), pour l'épinette blanche et le sapin baumier.

Tableau 27: Moyenne et écart-type, par site, des vitesses moyennes à l'intérieur du peuplement ( $U_{cMoy}$ ) pour l'épinette blanche et le sapin baumier

Site	$U_{cMoy}$ (km/h)	
	Épinette blanche	Sapin baumier
1	42,8 (6,0)	32,0 (3,5)
2	33,4 (5,3)	30,0 (3,5)
3	34,4 (5,2)	31,1 (4,4)
4	38,6 (5,9)	33,7 (3,1)
Total	37,0 (6,5)	31,4 (3,8)

La figure 53 illustre le comportement des tiges brisées et des tiges renversées, et ne présentent que les relations significatives existant entre la vitesse moyenne à l'intérieur du peuplement ( $U_{cMoy}$ ) et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche, car aucune relation ne s'est avérée significative pour le sapin baumier. Il est alors possible d'observer que les tiges brisées des épinettes blanches se comportent de façon similaire aux tiges renversées et qu'il y a

absence de forte relation linéaire ( $r > 0,70$ ) entre la vitesse moyenne à l'intérieur du peuplement et les variables indépendantes liées au système racinaire et à la taille de l'arbre.



(\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,05$ )

\*\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,01$ )

Figure 53: Comportement des tiges rompues (x), des tiges renversées (♦) et valeur du coefficient de corrélation de Pearson ( $r$ ) pour l'épinette blanche

Encore une fois, des régressions linéaires simples ont été réalisées entre la vitesse moyenne à l'intérieur du peuplement ( $U_{cMoy}$ ) et les différentes variables indépendantes ( $V_{rac}$ ,  $DHS$ ,  $DHP$ ,  $H_{tot}$ ,  $H/D$ ,  $H \cdot DHP^2$ ,  $W_{tige}$  et  $W$ ). Le tableau 28 ne présente que les équations de régression significatives pour l'épinette blanche, sous la forme:  $y = \beta_0 + \beta_1 x$ , car aucune régression linéaire simple ne s'est avérée significative pour le sapin baumier. S'y retrouvent l'ordonnée à l'origine ( $\beta_0$ ), la pente ( $\beta_1$ ) ainsi que le coefficient de détermination ajusté ( $R^2a$ ).

Tableau 28: Caractéristiques des régressions significatives impliquant la vitesse moyenne à l'intérieur du peuplement ( $U_{cMoy}$ ) et les différentes variables indépendantes pour l'épinette blanche

Variable	$\beta_0$	$\beta_1$	$R^2a$
$V_{rac}$ (m <sup>3</sup> )	33,791 **	5,466*	0,118
$DHS$ (cm)	24,171 **	0,559**	0,185
$DHP$ (cm)	26,205 **	0,580*	0,103
$HID$	54,896 **	-0,228*	0,129

\* Coefficient significatif ou équations significativement différentes au seuil  $\alpha = 0,05$

\*\* Coefficient significatif au seuil  $\alpha = 0,01$

À partir du tableau 28, il est possible de déterminer, à l'aide du coefficient de détermination ajusté ( $R^2a$ ), que bien que les régressions soient significatives, elles ne s'ajustent pas bien aux populations d'épinette blanche ( $R^2a$  variant entre 0,103 et 0,185).

#### 4.3.4) Vitesse critique au-dessus du couvert forestier

Les données climatologiques concernant les vitesses de vent sont généralement mesurées dans des conditions de milieu ouvert. Comme ces conditions peuvent être comparées à celles rencontrées au-dessus d'un couvert forestier, il est nécessaire d'exprimer la vitesse moyenne du vent à l'intérieur du peuplement ( $U_{cMoy}$ ) en fonction de la vitesse moyenne au-dessus du couvert forestier ( $U_{Moy}$ ), au moyen d'un facteur de conversion (Smith et al 1987). Selon l'information rassemblée par Smith et al (1987) et Lee (1978), le rapport  $U_{cMoy}/U_{Moy}$  peut varier entre 0,13 et 0,66, en raison de la variation de la densité des peuplements et de la distribution du feuillage.

Dans le cadre de cette étude, le rapport  $U_{cMoy}/U_{Moy}$  a été déterminé à l'aide des travaux de Smith et al (1987), en considérant la moyenne de la densité relative des sites (66,8% (Pothier 1998)) et la hauteur moyenne des arbres (14,3 m). Le rapport  $U_{cMoy}/U_{Moy}$  obtenu est de 0,34 et correspond aux valeurs mentionnées par Fons (1940) et Melaragno (1982), respectivement de 0,33 et 0,35, pour des forêts de conifères de densité moyenne. La vitesse moyenne au-dessus du couvert forestier ( $U_{Moy}$ ) nécessaire au renversement des tiges d'épinette blanche est alors de 109 km/h et de 92 km/h pour le sapin baumier.

Une coupe partielle dans ces peuplements ferait augmenter le rapport  $U_{cMoy}/U_{Moy}$  de sorte que la vitesse moyenne au-dessus du couvert forestier nécessaire au renversement des arbres ( $U_{Moy}$ ) serait diminuée. À titre d'exemple, si 25% du volume était récolté, le rapport  $U_{cMoy}/U_{Moy}$  pourrait alors passer de 0,34 à 0,40, diminuant ainsi  $U_{Moy}$  à 93 km/h pour l'épinette blanche et à 79 km/h pour le sapin baumier.

#### 4.4) DISCUSSION

Le modèle élaboré par Smith et al (1987) permet de calculer le moment de force maximal associé à une vitesse de vent à l'intérieur du peuplement. Dans le cadre de cette étude, la méthodologie a été inversée, de manière à calculer la vitesse maximale nécessaire au renversement en fonction du moment critique ( $M_c$ ) mesuré lors de l'étude de treuillage. Donc le modèle de Smith et al (1987) a été utilisé pour évaluer la vitesse maximale que peut supporter un arbre, lorsqu'il se retrouve soudainement exposé par la création d'une nouvelle bordure de peuplement ( $U_{cMax}$ ), de même qu'il a été amélioré pour tenir compte des rafales (Gardiner et al 2000) lors du calcul de la vitesse moyenne nécessaire au renversement des arbres à l'intérieur d'un peuplement ( $U_{cMoy}$ ) et au-dessus du couvert forestier ( $U_{Moy}$ ). Comme les rafales sont la principale cause de dommages en forêt (Quine et al 1995; Wood 1995), le fait d'ajouter un facteur de rafale au modèle élaboré par Smith et al (1987) constitue une amélioration notable.

##### 4.4.1) Considérations sur la méthodologie

La méthodologie utilisée ne considère que l'application statique d'une force. Tel que décrit au chapitre précédent, le modèle statique utilisé ne permet pas d'inclure l'effet de l'affaiblissement du système racinaire associé à l'oscillation prolongée des tiges dans de forts vents et par conséquent surestime la vitesse nécessaire au renversement (Oliver et Mayhead 1974; Gardiner et al 1997). Par contre, Woods (1995) mentionne que c'est à une force directe appliquée par une rafale de vent et non aux oscillations de la tige dans le vent que l'arbre adapte sa croissance. Même si la fréquence des rafales peut s'approcher de la fréquence de résonance des arbres lors d'oscillations, les règles simples de l'aérodynamisme suggèrent que

la perte d'énergie par contact soit tellement élevée lors de forts vents, que l'arbre ne peut entrer en résonance (Gardiner 1995; Wood 1995). Ceci vient renforcer l'hypothèse que l'application directe (statique) d'une force est la norme lors de forts vents (Wood 1995).

Avant de discuter des résultats, certaines précisions doivent être apportées sur un point concernant la méthodologie de l'expérience de treuillage et un autre touchant la méthodologie de l'étude portant sur l'évaluation de la vitesse critique nécessaire au renversement.

Dans le cadre de l'étude de treuillage, lors de la prise de données, les sections de cime ont été mesurées et tronçonnées à partir de la base de la cime vivante et non à partir du faîte de l'arbre, tel que mesuré lors de l'étude de Smith et al (1987). Cette modification a été réalisée de manière à maximiser la récupération des billes pour l'industrie du sciage et n'a aucun effet sur les résultats obtenus lorsqu'un profil de vent uniforme est utilisé à l'intérieur du peuplement. Par contre, dans la présente étude, il est serait plus difficile d'appliquer des vitesses de vent différentes ( $U_{c(i)}$ ) pour chaque section de cime (équation 22), car les sections terminales des cimes n'ont pas les mêmes longueurs. Dans le cadre d'études futures, où le profil de vent à l'intérieur du peuplement serait connu, la mesure des cimes à partir du faîte pourrait permettre d'ajuster rapidement le modèle en fonction du profil de vent dans le peuplement et ainsi obtenir un meilleur estimé de la vitesse maximale nécessaire au renversement des tiges à l'intérieur du peuplement. Il serait toutefois nécessaire d'ajuster le profil de vent pour chaque section de cime, afin de tenir compte des différences de hauteur entre les tiges, à l'intérieur d'un même peuplement.

La modélisation de la cime, telle que présentée à la figure 45, fait passer la cime des arbres en une série de cylindres imperméables et permet ainsi de calculer la surface sur laquelle agit le vent. En réalité, la surface frontale de la cime varie en fonction de la vitesse du vent, car la forme de la cime s'adapte de manière à offrir le moins de résistance au vent (Vogel 1992; Quine et al 1995; Vogel 1995). La force due à résistance de la cime au vent augmente de façon linéaire avec la vitesse du vent, en raison de la déformation de la cime dans le vent, ce qui diffère de la relation rencontrée avec un corps solide, où la force due à la résistance varie en fonction du carré de la vitesse du vent (Fraser 1962b; Fraser 1964; Quine et al 1995). Comme

les cimes ont été modélisées en cylindres imperméables (corps solides non déformables), la force appliquée par le vent augmente en fonction du carré de la vitesse du vent. Cette augmentation de la force est toutefois compensée par une réduction de la surface des cylindres qui a été calculée en fonction du volume de la cime et de la densité du feuillage.

#### 4.4.2) Caractéristiques de la cime

Dans le cadre de cette étude, les caractéristiques de la cime des arbres ont été analysées afin de déterminer certaines équations permettant d'intégrer l'épinette blanche et le sapin baumier au modèle Britannique *ForestGales* en vue d'une application de celui-ci dans l'Est du Canada. De plus, il est possible de comparer les équations obtenues pour déterminer s'il y a une différence statistiquement significative entre les cimes des deux essences à l'étude.

##### 4.2.2.1) Volume de la cime

Le volume de la cime a été calculé dans le but de déterminer la surface frontale exposée au vent. Comme les densités moyennes de feuillage sont comparables pour les deux essences, un volume de cime plus élevé se traduirait par une surface frontale plus élevée, ce qui entraînerait une plus grande exposition au vent. Des volumes de cime significativement différents pourraient ainsi expliquer en partie la différence entre les vitesses maximales ( $U_{cmax}$ ,  $U_{cmoy}$ ,  $U_{moy}$ ) pour les deux essences à l'étude. Suite à l'analyse du tableau 20, il est possible de conclure qu'il n'y a pas de différences significatives entre les équations impliquant le volume de la cime chez l'épinette blanche et le sapin baumier. Comme la mesure du volume de la cime a été obtenue grâce à la formule de Smalian, et qu'une variation de la densité à l'intérieur du peuplement peut affecter la symétrie des cimes (Short III et Burkhart 1992), le volume n'est donc pas la variable la plus adéquate pour comparer les cimes des arbres à l'étude.

##### 4.2.2.2) Poids de la cime

Le poids de la cime a été déterminé à l'aide de la cellule de charge, tel que décrit au point 3.2.6.2 du chapitre précédent. À partir des résultats présentés au tableau 21 et illustrés aux figures 47 et 48, il est possible de conclure que les relations entre le poids de la cime et le *DHP*, de même que celle impliquant le rapport *H/D* sont significativement différentes entre l'épinette blanche et le sapin baumier. Il en ressort que, pour un *DHP* ou un rapport *H/D*

donné, le poids de la cime du sapin baumier est significativement plus élevé que celui de l'épinette blanche.

Lorsque le vent agit sur une cime plus lourde, le moment de force induit par la gravité à la base de l'arbre est plus élevé. Ceci implique que lorsque le profil de vent est uniforme dans le peuplement (vitesse constante), le sapin baumier doit résister à un moment plus élevé que l'épinette blanche. Ceci peut expliquer en partie la différence de vitesses maximales ( $U_{cmax}$ ,  $U_{cmoy}$ ,  $U_{moy}$ ) rencontrée entre ces deux essences.

#### 4.2.2.3) Longueur de la cime

La seule relation impliquant la longueur de la cime à être significativement différente entre l'épinette blanche et le sapin baumier est celle comprenant le rapport  $H/D$ . Il en ressort que la longueur de la cime est plus importante chez les tiges de sapin baumier ayant un rapport  $H/D$  inférieur à 95. Une cime plus longue, pour un arbre nouvellement exposé au vent en bordure de peuplement ou suite à une coupe partielle, peut impliquer une plus grande susceptibilité au renversement en raison d'une augmentation de la surface frontale exposée au vent (Quine et al 1995). Lorsque le profil de vent est uniforme dans le peuplement (vitesse constante), le sapin baumier doit résister à un moment plus élevé que l'épinette blanche. Ceci peut être un autre facteur permettant d'expliquer la différence entre les vitesses maximales ( $U_{cmax}$ ,  $U_{cmoy}$ ,  $U_{moy}$ ) calculées pour ces deux essences.

#### 4.2.2.4) Diamètre de la cime

Lors de l'étude du diamètre de la cime, il est apparu qu'il n'y a pas de relation linéaire significative entre cette variable et la hauteur totale pour l'épinette blanche. Les relations impliquant le diamètre de la cime et les autres variables indépendantes n'expliquent toutefois qu'une faible proportion de la variance (16,7 à 35%). Cette grande variabilité de la largeur de la cime peut s'expliquer par une variation de l'espace disponible pour la croissance des arbres (densité à l'échelle de l'arbre) (Wile 1964; Zeide 1995). Dans le cadre de cette étude, contrairement à ce qui a été observé entre l'épinette blanche et le sapin baumier lors de l'étude de Vézina (1962), il n'existe aucune différence significative entre les relations impliquant le diamètre de la cime et le  $DHP$ . La différence observée entre ces deux études s'explique par



l'absence de compétition lors de l'étude de Vézina (1962), où les tiges échantillonnées étaient libres de compétition de tous côtés et dont les branches s'étendaient jusqu'au sol. Il n'est donc pas surprenant que les résultats diffèrent.

Parmi toutes les équations impliquant les variables associées à la cime des arbres, ce sont les équations impliquant le poids de la cime et le *DHP*, qui expliquent la plus grande partie de la variance de la population. Ceci est en accord avec les résultats de l'étude de Wile (1964), qui stipule que le poids est mieux corrélé avec le *DHP* que le diamètre ou la longueur de la cime.

#### 4.4.3) Vitesse critique en bordure du peuplement

En bordure de peuplement, la moyenne de la vitesse maximale ( $U_{cMax}$ ) est plus élevée pour l'épinette blanche que pour le sapin baumier. Il est alors possible de conclure à une plus grande résistance au renversement chez l'épinette blanche. Une cime plus légère, plus courte, de même qu'un rapport *H/D* plus faible peuvent en partie expliquer cette résistance accrue.

L'analyse des figures 50 et 51 permet d'observer l'absence de forte relation linéaire ( $r > 0,70$ ) entre la vitesse maximale en bordure de peuplement et les variables indépendantes liées au système racinaire et à la taille de l'arbre. Cette analyse permet aussi de comparer le comportement des tiges brisées face à celui des tiges renversées et de conclure qu'il n'y a pas de différence entre les modes de chablis rencontrés lors de cette étude. Cette absence de différence peut s'expliquer par des moments critiques comparables, tel que calculé lors de l'étude de treuillage.

Les tableaux 25 et 26 présentent les équations de régression impliquant la vitesse maximale en bordure de peuplement en fonction des différentes variables indépendantes à l'étude. Ces relations n'expliquent qu'entre 11 et 19% de la variance de la population chez l'épinette blanche et le sapin baumier. La faible explication de la variance lors du calcul des vitesses critiques peut s'expliquer par la grande quantité de variables entrant dans le processus complexe du chablis (Alexander 1964; Blackburn et al 1988; Ruel 1995).

Ces équations ne présentent que des effets linéaires significatifs et hautement significatifs. Il

en est de même pour la comparaison des équations obtenues entre les deux essences à l'étude, qui indique une différence hautement significative. Il ressort de l'analyse de la figure 52 que pour un même rapport  $H/D$ , l'épinette blanche possède une vitesse maximale en bordure de peuplement significativement plus élevée que le sapin baumier. Alors, si le rapport  $H/D$  de l'épinette blanche est plus faible que celui du sapin baumier, au sein d'un même peuplement, la différence de vitesse maximale en bordure de peuplement serait encore plus importante.

Même si les équations de régression n'expliquent pas une grande partie de la variance de la population, les moyennes des vitesses maximales calculées dans le cadre de cette étude (57 km/h pour le sapin baumier et 74 km/h pour l'épinette blanche) correspondent bien à la vitesse des rafales qui ont provoqué des dommages lors de la tempête qui balaya le territoire de la Forêt Montmorency, le 7 novembre 1994. Les remarques personnelles sur l'observation de phénomènes particuliers, réalisées par le responsable des relevés météorologiques à la station de la Forêt Montmorency, mentionnent des vents soufflant en rafales de 58 à 97 km/h (Québec 1994). Ces vents ont engendré quelques chablis partiels en bordures de chemins et en lisières de peuplements ainsi qu'un chablis total sur une petite zone très exposée. Bien qu'il n'y ait pas eu d'inventaire systématique des dégâts et que les dommages aient été mineurs, les vitesses maximales observées lors de cette tempête correspondent aux vitesses maximales calculées pour le renversement de tiges de sapin baumier et d'épinettes blanches nouvellement exposées en bordure de peuplement.

#### 4.4.4) Vitesse critique à l'intérieur du peuplement

À l'intérieur du peuplement, tout comme en bordure du peuplement, la moyenne de la vitesse moyenne ( $U_{cMoy}$ ) est plus élevée pour l'épinette blanche que pour le sapin baumier. Cette résistance accrue au renversement chez l'épinette blanche peut encore s'expliquer par une cime plus légère, plus courte, de même qu'un rapport  $H/D$  plus faible.

Comme la vitesse critique à l'intérieur du peuplement est définie à partir de la vitesse maximale en bordure de peuplement, il n'est pas surprenant d'observer l'absence de forte relation linéaire ( $r > 0,70$ ), aux figures 53 et 54, entre la vitesse à l'intérieur du peuplement et les variables indépendantes liées au système racinaire et à la taille de l'arbre. Il en est de même

en ce qui concerne le comportement des tiges brisées, qui est semblable à celui des tiges renversées.

Le tableau 28 présente les équations de régression significatives impliquant la vitesse moyenne à l'intérieur du peuplement et les différentes variables indépendantes à l'étude. Ces relations n'expliquent qu'entre 10 et 19% de la variance de la population chez l'épinette blanche. Encore une fois, cette faible explication de la variance lors du calcul des vitesses critiques peut s'expliquer par la grande quantité de variables entrant dans le processus complexe du chablis (Alexander 1964; Blackburn et al 1988; Ruel 1995).

Lors de la tempête du 7 novembre 1994, les vents n'ont pas été assez puissants pour engendrer des dommages importants à l'intérieur des peuplements de la Forêt Montmorency. Selon les calculs réalisés, les peuplements qui ont servi à la présente étude n'auraient pas été affectés par des rafales de 58 à 97 km/h (vitesse moyenne de 48 km/h) (Québec 1994). Par contre, des vents dont la vitesse moyenne aurait été de près de 90 km/h auraient été susceptibles de causer des dommages aux sapins baumiers de ces peuplements.

La moyenne des vitesses moyennes nécessaires au renversement des tiges à l'intérieur du peuplement, calculées dans le cadre de cette étude (92 km/h), est légèrement supérieure à celle calculée à l'aide du modèle Britannique *ForestGales* adapté pour le sapin baumier (82 km/h) (Ruel et al 2000). Cet écart peut s'expliquer par la différence entre les deux approches utilisées pour déterminer la vitesse critique susceptible de renverser les tiges de sapin baumier à l'intérieur d'un peuplement.

Les vitesses calculées pour l'épinette blanche et le sapin baumier sont aussi plus élevées que celles calculées par Smith et al (1987) pour l'épinette noire. Cette différence peut toutefois s'expliquer par la différence entre les essences étudiées et par la nature des sols sur lesquels les expériences ont été réalisées (argile vs loam sableux et sable loameux).

## DISCUSSION GÉNÉRALE

L'étude de treuillage réalisée dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc (Thibault 1985) a permis de calculer des équations de régression entre le moment critique ( $M_c$ ) et différentes variables liées à la taille des épinettes blanches et des sapins baumiers. Il en ressort que le poids de la tige ( $W_{tige}$ ), exprimé en kN, constitue la variable qui explique la plus grande partie la variance du moment critique dans la population d'épinettes blanches et de sapins baumiers. Cette variable avait aussi été retenue lors des études de Fraser (1962a), Fraser et Gardiner (1967) de même que dans le modèle Britannique *ForestGales* (Gardiner et al 1997). Le résultat de la comparaison des équations du moment critique en fonction du poids de la tige n'a révélé aucune différence statistiquement significative entre le sapin baumier et l'épinette blanche. Il serait donc possible de déterminer le moment critique de ces deux essences à l'aide d'une même équation utilisant le poids de la tige comme variable définissant la taille de l'arbre. Cette équation serait valable dans des peuplements âgés de 50 à 60 ans et qui sont peu affectés par des caries de racines.

L'étude de treuillage réalisée par Silva (1996) sur des sapins baumiers avec ou sans défaut externe, dans la région de l'Outaouais, présentait des moment critiques inférieurs à ceux calculés dans le cadre de la présente étude. La principale raison expliquant cette différence réside en une plus grande quantité de carie de souche et de tronc rencontrée dans les sapins baumiers de l'Outaouais. Il est donc important de considérer la variation de la quantité de carie entre les régions et les sites (Whitney 1989; Basham 1991), lors de l'utilisation des équations du moment critique.

L'étude de treuillage a aussi permis de mettre en évidence que les tiges possédant un rapport  $H/D$  plus faible ont un moment critique plus élevé, conclusions semblables à celles de Petty et Worrell (1981), Savill (1983), De Champs (1987) et Peltola et Kellomäki (1993). Par la suite, l'étude portant sur la vitesse associée au moment critique engendrant le renversement des tiges de sapin baumier et d'épinette blanche est venue confirmer l'hypothèse que les tiges possédant un rapport  $H/D$  plus faible ont aussi une vitesse critique plus élevée.

Cette étude a aussi permis d'établir des équations servant à caractériser les cimes des sapins baumiers et des épinettes blanches et qui serviront à adapter le modèle Britannique *ForestGales* aux conditions et aux essences forestières de l'Est du Canada. Il en est ressorti que le sapin baumier possède une cime plus lourde et plus longue que l'épinette blanche, ce qui augmente le moment de force induit par la gravité de même que l'emprise du vent dans la cime du sapin baumier, deux facteurs qui contribuent à diminuer la vitesse critique nécessaire au renversement. Il est alors nécessaire d'utiliser des équations distinctes pour modéliser la cime du sapin baumier et de l'épinette blanche.

Les équations impliquant la vitesse critique en bordure et à l'intérieur du peuplement ont présenté des différences significatives entre le sapin baumier et l'épinette blanche, cette dernière présentant toujours des vitesses critiques supérieures. Il est donc nécessaire de considérer séparément le sapin baumier et l'épinette blanche, lorsque vient le temps de considérer la susceptibilité au renversement pour une vitesse de vent donnée.

Ces résultats peuvent influencer le choix des tiges à conserver lors de traitements sylvicoles impliquant une coupe partielle. La sélection systématique des tiges d'épinettes blanches comme arbres d'avenir lors d'éclaircies précommerciales, au détriment du sapin baumier, améliorera la résistance au renversement, en plus d'améliorer la résistance du peuplement à la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Blais 1980; Schmitt et al 1984). Dans le cadre de coupes partielles, telle l'éclaircie commerciale et la coupe progressive d'ensemencement, l'emphase devrait être mise sur la conservation des tiges d'épinettes blanches et par la suite, sur la conservation des tiges de sapin baumier de plus faibles rapport  $H/D$ .

Comme la susceptibilité à la carie du sapin baumier augmente avec l'âge et demeure supérieure à celle de l'épinette blanche (Whitney 1976; Whitney 1989; Basham 1991), il est à prévoir que la différence entre les vitesses critiques nécessaires au renversement peut augmenter avec l'âge des peuplements.

## CONCLUSION

La présente étude permet le calcul du moment critique et de la vitesse du vent nécessaire au renversement d'épinettes blanches ou de sapins baumiers à l'aide d'équations simples impliquant les variables liées à la taille de l'arbre. Ces équations peuvent être appliquées à des sapinières de 50 ans du domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc, se développant sur des tills profonds dont le drainage est modéré et sans écoulement latéral (*seepage*).

Parmi toutes les variables étudiées, c'est le poids de la tige qui explique la plus grande partie de la variance du moment critique à l'intérieur des populations. Toutefois, lors de la comparaison des équations du moment critique entre les essences à l'étude, seules les équations impliquant la hauteur totale étaient significativement différentes. Cette différence s'est expliquée par des relations hauteur/diamètre significativement différentes, impliquant une résistance accrue en flexion et un moment critique plus élevé pour l'épinette blanche.

De plus, la faible quantité de carie observée au niveau de la souche et des racines permet de conclure qu'en absence de carie, des tiges de sapins baumier et d'épinette blanche de même rapport  $H/D$  possèdent des moments critiques statistiquement semblables. Il est donc possible de calculer le moment critique des tiges de sapin baumier et d'épinette blanche à l'aide d'une même équation impliquant le poids de la tige.

En ce qui concerne la modélisation de l'emprise du vent dans la cime, les différences observées entre les essences à l'étude au niveau du poids et la longueur de la cime ne permettent pas l'utilisation d'une équation unique. Ces différences peuvent en partie expliquer les différences significatives rencontrées entre le sapin baumier et l'épinette blanche, lors de l'analyse des équations impliquant la vitesse critique nécessaire au renversement.

## BIBLIOGRAPHIE

**Albini, F.A. et R.G. Baughman 1979.** Estimating windspeed for predicting wildland fire behavior. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper INT-221.

**Alexander, R.R. 1964.** Minimizing windfall around clear cuttings in spruce-fir forests. *Forest Science* 10: 130-142.

**Anonyme 1987a.** Le système canadien de classification des sols. Direction de la recherche, Ministère de l'agriculture du Canada, Ottawa. 170 p.

**Anonyme 1987b.** Wood handbook: wood as an engineering material. Forest Products Laboratory, U. S. Department of Agriculture, Washington, D. C. 466 p.

**Anonyme 1992.** Manuel d'aménagement forestier. Gouvernement du Québec, Ministère des forêts. 267 p.

**Anonyme 1994a.** Une stratégie; aménager pour mieux protéger les forêts. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Direction des programmes forestiers. 197 p.

**Anonyme 1994b.** Relevés météorologiques, station Forêt Montmorency. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction des réseaux atmosphériques.

**Anonyme 1999.** Loi sur les forêts, L.R.Q., chapitre F-4.1, dernière modification: 1er juillet 1999. Éditeur officiel du Québec.

**Assmann, E. 1970.** The principles of forest yield study: studies in the organic production, structure, increment and yeild of forest stands. Pergamon Press, Oxford. 506 p.

**Bakuzis, E.V. et H.L. Hansen 1965.** Balsam fir. A monographic review. University of Minnesota Press, Minneapolis, Minnesota. 445 p.

**Basham, J.T. 1991.** Stem decay in living trees in Ontario's forests: a user's compendium and guide. Forestry Canada, Great Lakes Forestry Center, Information Report O-X-408.

**Bélanger, L., L. Bertrand, P. Bouliane et L.-J. Lussier 1991.** Plan général d'aménagement de la Forêt Montmorency (Révision 1990). Département des sciences forestières, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec. 215 p.

**Bélanger, L., S. Morel et S. Lemay 1997.** Guide d'identification des écosystèmes de la Forêt Montmorency (Région écologique des Moyennes Laurentides de la Jacques-Cartier (8f)). Département des sciences forestières, Université Laval, Québec. 65 p.

**Bélanger, L., S. Paquette, S. Morel, J. Bégin, P. Meek, L. Bertrand, P. Beauchesne, S. Lemay et M. Pineau 1995.** Indices de qualité de station du sapin baumier dans le sous-domaine écologique de la sapinière à bouleau blanc humide. *The Forestry Chronicle* 71: 317-325.

**Bertrand, V. et H. Bolghari 1970.** L'effêt d'une coupe d'éclaircie dans un peuplement dense d'épinettes et de sapin baumier âgé de 45 ans au sud-est de Québec. Ministère des Terres et Forêts du Québec, Service de la Recherche, Direction Générale de la Planification, Mémoire No. 1.

**Blackburn, P., J.A. Petty et K.F. Miller 1988.** An assessment of the static and dynamic factors involved in windthrow. *Forestry* 61: 29-43.

**Blais, J.R. 1980.** Condition du sapin et de l'épinette blanche dans la région du Parc des Laurentides en 1979 face à l'épidémie de la tordeuse, et prévision des pertes. Centre de Recherches Forestière des Laurentides, Rapport d'Information LAU-X-43.



**Bolduc, P. et C. Bouchard 1996.** Carte écoforestière suite à l'inventaire écoforestier de 1992 à la Forêt Montmorency. Québec.

**Bouchon, J. 1987.** État de la recherche relative aux dégâts forestiers dus aux tempêtes. *Revue Forestière Française* 39: 301-312.

**Buck, C.C. 1964.** Wind over wildlands-a guide for forest management. USDA Forest Service, Agriculture Handbook 272.

**Burns, R.M. et B.H. Honkala 1990.** Silvics of North America. USDA Forest Service, Agriculture Handbook 654, Vol. 1 Conifers.

**Busby, J.A. 1965.** Studies on the stability of conifer stands. *Scottish Forestry* 19: 86-102.

**Cech, M.Y. et F. Pfaff 1980.** Kiln operator's manual for Eastern Canada. Eastern Forest Products Laboratory, Forintek Canada Corporation, Special Publication SP504ER.

**Chow, G.C. 1960.** Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions. *Econometrica* 28: 591-605.

**Côté, M. 1966.** Plan général d'aménagement de la Forêt Montmorency à l'usage des professeurs et des étudiants de la Faculté de Foresterie et de Géodésie. Presses de l'Université Laval, Québec. 160 p.

**Côté, M. 1993.** Redressement d'images sur micro-ordinateur. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec. 142 p.

**Coutts, M.P. 1983.** Root architecture and tree stability. *Plant and Soil* 71: 171-188.

**Cremer, K.W., C.J. Borough, F.H. McKinnell et P.R. Carter 1982.** Effects of stocking and thinning on wind damage in plantation. *New Zealand Journal of Forest Science* 12: 244-268.

- De Champs, J. 1987.** Mesures sylvicoles préventives. *Revue Forestière Française* 39: 313-322.
- Deans, J.D. et E.D. Ford 1983.** Modelling root structure and stability. *Plant and Soil* 71: 189-195.
- Duncan, R. et B.C. Nicoll 1998.** The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce. *Forestry* 71: 169-182.
- Fons, W.L. 1940.** Influence of forest cover on wind velocity. *Journal of Forestry* 38: 481-486.
- Fox, R.W. et A.T. McDonald 1992.** Introduction to fluid mechanics. John Wiley & Sons, Inc., New York. 829 p.
- Frank, R.M. et J.C. Bjorkbom 1973.** A silvicultural guide for spruce-fir in the Northeast. USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, General Technical Report NE-6.
- Fraser, A.I. 1962a.** The soil and roots as factors in tree stability. *Forestry* 35: 117-127.
- Fraser, A.I. 1962b.** Wind tunnel studies of the forces acting on the crowns of small trees. *In* Report on forest research for the year ended March 1962. *Edited by* Forestry Commission. HMSO, London. p.178-183
- Fraser, A.I. 1964.** Wind tunnel and other related studies on coniferous trees and tree crops. *Scottish Forestry* 18: 84-92.
- Fraser, A.I. et J.B.H. Gardiner 1967.** Rooting and Stability in Sitka Spruce. HMSO, London. 28 p.
- Fredericksen, T.S., R.L. Hedden et S.A. Williams 1993.** Testing loblolly pine wind firmness with simulated wind stress. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1760-1765.

**Fritschen, L.J. 1985.** Characterization of boundary conditions affecting forest environmental phenomena. *In* The forest-atmosphere interaction : proceedings of the Forest Environmental Measurements Conference held at Oak Ridge, Tennessee, October 23-28, 1983. *Edited by* B. A. Hutchinson and B. B. Hicks. D. Riedel Publishing Company, Dordrecht. p. 3-23

**Gardiner, B. 1997.** Standing up to storms. *Biologist* 44: 317-321.

**Gardiner, B., H. Peltola et S. Kellomäki 2000.** The development and testing of models to predict the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological modelling* Sous presse.

**Gardiner, B.A. 1994.** Wind and wind forces in a plantation spruce forest. *Boundary-Layer Meteorology* 67: 161-186.

**Gardiner, B.A. 1995.** The interactions of wind and tree movement in forest canopies. *In* Wind and trees. *Edited by* M. P. Coutts and J. Grace. Cambridge University Press, Cambridge. p. 41-59

**Gardiner, B.A., G.R. Stacey, R.E. Belcher et C.J. Wood 1997.** Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. *Forestry* 70: 233-252.

**Gere, J.M. et S. Timoshenko 1990.** Mechanics of materials. PSW-KENT Publishing Company, Boston. 807 p.

**Harris, A.S. 1989.** Wind in the forests of Southeast Alaska and guides for reducing damage. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, General Technical Report PNW-GTR 244.

**Hassinen, A., M. Lemitten, H. Petola, S. Kellomäki et B. Gardiner 1998.** A prism-based system for monitoring the swaying of trees under wind loading. *Agricultural and Forest Meteorology* 90: 187-194.

**Hintikka, V. 1972.** Wind induced root movements in forest trees. *Comm. Inst. Forest. Fenn.* 76: 56 p.

**Hsi, G. et J.H. Nath 1970.** Wind drag within simulated forest canopies. *Journal of Applied Meteorology* 9: 592-602.

**Hütte, P. 1968.** Experiments on windflow and wind damage in Germany; site and susceptibility of spruce forests to storm damage. *Supplement to Forestry* : 20-27.

**Innes, L., L. Marchand, S. Simard et Ministère des Ressources naturelles 1994.** Principales maladies des arbres au Québec. Publications du Québec, Sainte-Foy, Québec. 78 p.

**Jessome, A.P. 1977.** Strength and related properties of woods grown in Canada. Eastern Forest Products Laboratory, Fisheries and Environment Canada, Forestry Technical Report 21.

**Johnston, W.F. 1986.** Manager's handbook for balsam fir in the North Central States. USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station, General Technical Report NC-111.

**Kerzenmacher, T. et B. Gardiner 1998.** A mathematical model to describe the dynamic response of a spruce tree to the wind. *Trees* 12: 385-394.

**Krasowski, M.J., C.D.B. Hawkins, H. Coates et P.K. Ott 1996.** Static tests of lodgepole pine stability in the central interior of British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research* 26: 1463-1472.

**Lee, R. 1978.** *Forest Microclimatology.* Columbia University Press, New York. 276 p.

**Leiser, A.T. et J.D. Kemper 1973.** Analysis of stress distribution in the sapling tree trunk. *Journal of American Society Horticulture and Science* 98: 164-170.

**Lieffers, V.J. et R.L. Rothwell 1987.** Rooting of peatland black spruce and tamarack in relation to depth of water table. *Canadian Journal of Botany* 65: 817-821.

**Lohmander, P. et F. Helles 1987.** Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2: 227-238.

**Lortie, M. 1968.** Quelques défauts indicateurs de carie chez le sapin baumier. *Fonds de recherche forestière de l'Université Laval, Bulletin* 11.

**Mattheck, C. 1991.** *Trees: the mechanical design.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 121 p.

**Mayer, H. 1987.** Wind-induced tree sways. *Trees* 1: 195-206.

**Mayhead, G.J. 1973.** Sway periods of forest trees. *Scottish Forestry* 27: 19-23.

**McClintock, T.F. 1954.** Factors affecting wind damage in selectively cut stands of spruce and fir in Maine and northern New Hampshire. *USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Station Paper* 70.

**Melaragno, M.G. 1982.** *Wind in architectural and environmental design.* Van Nostrand Reinhold, New York. 684 p.

**Mergen, F. 1954.** Mechanical aspects of wind-breakage and windfirmness. *Journal of Forestry* 52: 119-125.

- Miller, K.F. 1985.** Windthrow hazard classification. HMSO, London. 14 p.
- Mitchell, S.J. 1995a.** A synopsis of windthrow in British Columbia: occurrence, implications, assessment and management. *In* Wind and trees. *Edited by* M. P. Coutts and J. Grace. Cambridge University Press, Cambridge. p. 448-459
- Mitchell, S.J. 1995b.** The windthrow triangle: A relative windthrow hazard assessment procedure for forest managers. *The Forestry Chronicle* 71: 446-450.
- Monteith, J.L. 1975.** Vegetation and the atmosphere. Academic Press, London. 278 p.
- Moore, K. 1977.** Factors contributing to blowdown in streamside leave strips on Vancouver Island. British Columbia Ministry of Forests Land Management, Report 3.
- Mosbrugger, V. 1990.** The tree habit in land plants : a functional comparison of trunk constructions with a brief introduction into the biomechanics of trees. Lecture notes in earth sciences. Springer-Verlag, Berlin. vol 28, 161 p.
- Neter, J., M.H. Kutner, C.J. Nachtsheim et W. Wasserman 1996.** Applied Linear Regression Models. Irwin, Chicago. 720 p.
- Nienstaedt, H. 1957.** Silvicultural characteristics of white spruce (*Picea glauca*). USDA Forest Service, Lake States Forest Experiment Station, Station Paper No. 55.
- Niklas, K.J. 1992.** Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function. The University of Chicago Press, Chicago & London. 607 p.
- Norušis, M.J. 1994.** SPSS 6.1 Base system user's guide, part 2. SPSS inc., Chicago. 547 p.
- Neustein, S.A. 1971.** Damage to forest in relation to topography, soil and crop. *In* Windblow of Scottish forest in January 1968. *Edited by* B. W. Holtman. HMSO, Forestry Commission Bulletin 45, Edinburgh. p. 42-51

- Oliver, H.R. et G.J. Mayhead 1974.** Wind measurements in a pine forest during a destructive gale. *Forestry* 47: 185-194.
- O'Sullivan, M.F. et R.M. Ritchie 1993.** Tree stability in relation to cyclic loading. *Forestry* 60: 69-82.
- Parent, B. 1996.** Quebec's Forest resources and industries. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Statistical Report 1996 Edition. 142 p.
- Peltola, H. 1996.** Model computations on wind flow and turning moment by wind for Scots pines along margins of clear-cut areas. *Forest Ecology and Management* 83: 203-215.
- Peltola, H. et S. Kellomäki 1993.** A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fennica* 27: 99-111.
- Peltola, H., M.-L. Nykänen et S. Kellomäki 1997.** Model computations on the critical combination of snow loading and windspeed for snow damage of scots pine, Norway spruce and Birch sp. at stand edge. *Forest Ecology and Management* 95: 229-241.
- Petty, J.A. et C. Swain 1985.** Factors influencing stem breakage of conifers in high winds. *Forestry* 58: 75-84.
- Petty, J.A. et R. Worrel 1981.** Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow. *Forestry* 54: 115-128.
- Pin, D. et J.-C. Ruel 1996.** Défauts indicateurs de faiblesse mécanique chez les principaux arbres du Québec. Université Laval/Hydro-Québec, Québec. 84 p.
- Pothier, D. 1998.** L'éclaircie commerciale dans les forêts résineuses ... un outil d'aménagement souple et efficace. Ministère des Ressources naturelles Québec, La Foresterie Sans Détours.

**Pothier, D. et F. Savard 1998.** Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Québec. 183 p.

**Quine, C., M. Coutts, B. Gardiner et G. Pyatt 1995.** Forests and wind: Management to minimise damage. HMSO, London. vii + 24 p.

**Quine, C. et B. Gardiner 1998.** Forestgales - Replacing the windthrow hazard classification. Forestry commission, Forest Research, Annual report and accounts 1997-98.

**Quine, C.P. 1995.** Assessing the risk of wind damage to forests: practice and pitfalls. *In* Wind and trees. Edited by M. P. Coutts and J. Grace. Cambridge University Press, Cambridge. p. 379-403

**Raynor, G.S. 1971.** Wind and temperature structure in a coniferous forest and continuous field. *Forest Science* 17: 351-363.

**Reifsnyder, W.E. 1955.** Wind profiles in a small isolated forest stand. *Forest Science* 1: 289-297.

**Robertson, A. 1987.** The use of trees to study wind. *Arboricultural Journal* 11: 127-143.

**Ruel, J.-C. 1995.** Understanding windthrow: Silvicultural implications. *The Forestry Chronicle* 71: 434-445.

**Ruel, J.-C., C.P. Quine, S. Meunier et J. Suarez 2000.** Estimating windthrow risk in balsam fir stands with the *ForestGales* model. *Forestry Chronicle* 76: 329-337.

**Ruth, R.H. et R.A. Yoder 1953.** Reducing wind damage in the forest of the Oregon coast range. USDA Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland. 30 p.



- Savill, P.S. 1983.** Silviculture in windy climate. *Forestry Abstract* 44: 473-488.
- Schaetzl, R.J., D.L. Johnson, S.F. Burns et T.W. Small 1989.** Tree uprooting: review of terminology, process, and environmental implications. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 1-11.
- Schmitt, D.M., D.G. Grimble et J.L. Searcy 1984.** Spruce budworms handbook: Managing the spruce budworm in Eastern North America. U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 620.
- Service Canadien des Forêts 1995.** Terminologie de la sylviculture au Canada. Ottawa. 223 p.
- Short III, E.A. et H.E. Burkhart 1992.** Predicting crown-height increment for thinned and unthinned loblolly pine plantations. *Forest Science* 38: 594-610.
- Silvester, F.D. 1967.** Timber: its mechanical properties and factor affecting its structural use. Pergamon press, Oxford. 152 p.
- Smith, V.G., M. Watts et D.F. James 1987.** Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 1080-1091.
- Snedecor, G.W. et W.G. Cochran 1971.** Méthodes statistiques. Association de coordination technique agricole, Paris. 649 p.
- Sokal, R.R. et F.J. Rohlf 1981.** Biometry: The principles and practice of statistics in biological research. W. H. Freeman and Company, San Francisco. 859 p.
- Somerville, A. 1980.** Wind stability: forest layout and silviculture. *New Zealand Journal of Forestry Science* 10: 476-501.

**Stacey, G.R., R.E. Belcher, J.C. Wood et B.A. Gardiner 1994.** Wind flows and forces in a model spruce forest. *Boundary-Layer Meteorology* 69: 311-334.

**Stathers, R.J., T.P. Rollerson et S.J. Mitchell 1994.** Windthrow Handbook for British Columbia Forest. Ministry of Forest, Victoria. 31 p.

**Strong, W.L. et G.H. La Roi 1983.** Root-system morphology of common boreal forest trees in Alberta, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 13: 1164-1173.

**Sutton, R.F. 1969.** Silvics of white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss). Department of Fisheries and Forestry - Canada, Forestry Branch Publication 1250.

**Sylva, G. 1996.** Étude de la résistance d'arbres soumis à une simulation de l'action du vent dans la région de l'Outaouais au Québec. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec. 158 p.

**Sylva, G., J.-C. Ruel, G. Samson et D. Pin 1998.** Influence de quelques défauts externes sur la stabilité des arbres face à une simulation mécanique de l'action du vent. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 123-131.

**Telewski, F.W. 1995.** Wind-induced physiological and developmental responses in trees. *In* Wind and trees. Edited by M. P. Coutts and J. Grace. Cambridge University Press, Cambridge. 237-263 p.

**Thibault, M. 1985.** Les régions écologiques du Québec méridional, Service de la recherche forestière et Service de la cartographie, Ministère de l'Énergie et des Ressources.

**Vézina, P.-E. 1962.** Crown width-d.b.h. relationships for open-grown balsam fir and white spruce in Quebec. *The Forestry Chronicle* 38: 463-473.

**Vézina, P.-E. et G. Paillé 1969.** Aménagement intensif des sapinières mûres et surannées à la Forêt Montmorency. Fonds de recherches forestières de l'Université Laval, Contribution 14.

**Vogel, S. 1992.** Twist-to-bend ratios and cross-sectional shapes of petioles and stems. *Journal of Experimental Botany* 43: 1527-1532.

**Vogel, S. 1995.** Twist-to-bend ratios of woody structures. *Journal of Experimental Botany* 46: 981-985.

**Whitney, R.D. 1976.** Root rot of spruce and balsam fir in northwestern Ontario. I Damage and implication for forest management. Canadian Forest Service, Great Lakes Forest Center, Report O-X-241.

**Whitney, R.D. 1988.** L'ennemi caché: transfert de la technologie concernant les pourridiés. Service Canadien des Forêts, Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Sault Ste Marie. 35 p.

**Whitney, R.D. 1989.** Root rot damage in naturally regenerated stands of spruce and balsam fir in Ontario. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 295-308.

**Wile, B.C. 1964.** Crown size and stem diameter in red spruce and balsam fir. Canada Department of forestry, Department of forestry Publication 1056.

**Wood, C.J. 1995.** Understanding wind forces on trees. *In* Wind and trees. *Edited by* M. P. Coutts and J. Grace. Cambridge University Press, Cambridge. p. 133-164

**Worrall, J.J. 1991.** Media for selective isolation of Hymenomycetes. *Mycologia* 83: 296-302.

**Zar, J.H. 1984.** Biostatistical analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 718 p.

**Zeide, B. 1995.** A relation between size of trees and their number. *Forest Ecology and Management* 72: 265-272.