



F O R M A T I O N

continue

Cours no. 23

LA SYLVICULTURE FACE AU RISQUE DE CHABLIS

Mise à jour

Par Jean-Claude Ruel, ing.f., PhD.
Professeur à la Faculté de foresterie et de géomatique,
Université Laval.

INTRODUCTION

Le renversement des arbres par le vent est un processus complexe, résultant de l'interaction d'une série de facteurs naturels ou d'origine anthropique. Ce phénomène, à peu près universel, a été reconnu par Stephens (1956) comme un processus important dans la dynamique forestière. En effet, le renversement a un impact sur la régénération des peuplements. Ainsi, dans le cas d'espèces tolérantes à l'ombre, il peut libérer une régénération préétablie et accélérer son développement. Dans d'autres cas, l'élimination du couvert sur une certaine superficie fournira la lumière nécessaire à l'installation d'essences intolérantes ou semi-tolérantes. Le renversement aura aussi pour effet d'amener une exposition du sol minéral, ce qui constitue une condition favorable à la germination de certaines espèces. Le bouleau jaune constitue un exemple d'espèces adaptées à s'installer après chablis (Burns et Honkala 1990). Le renversement des arbres influence aussi de façon importante la pédogénèse. En effet, il provoque un mélange des horizons dont l'effet s'apparente à celui du labour (Mueller et Cline 1959).

Les dommages causés par le vent constituent une préoccupation importante du sylviculteur puisqu'ils peuvent engendrer des pertes considérables. Celles-ci demeurent toutefois difficiles à quantifier sauf dans le cas où des dommages de nature catastrophique ont fait l'objet d'études détaillées (Grayson 1987). Les dommages causés par le vent peuvent se produire par renversement ou encore par bris de tiges. Bien que la force exercée soit de même nature dans les deux cas, les facteurs de résistance diffèrent. Notre préoccupation portera ainsi principalement sur le renversement des arbres bien qu'on traite aussi à l'occasion du bris de tiges.

Face à l'éventualité du chablis, diverses attitudes sont possibles. On peut le considérer comme

une fatalité contre laquelle on ne peut rien, ce qui semble justifié dans le cas de tempêtes très intenses auxquelles rien n'a résisté (De Champs 1987). Le plus souvent toutefois, malgré un certain caractère aléatoire, les dommages sont au moins en partie prévisibles ou évitables à l'aide de mesures sylvicoles appropriées. Le présent texte propose ainsi de faire le point sur l'état actuel des connaissances sur les facteurs associés à la susceptibilité au chablis en vue de pouvoir les considérer dans l'élaboration de prescriptions sylvicoles. Il constitue une mise à jour de revues de littérature déjà publiées (Ruel 1992; Ruel 1995).

ASPECTS MÉCANIQUES DU RENVERSEMENT DES ARBRES

Avant d'aborder directement l'étude des paramètres affectant le risque de renversement, il convient d'examiner les forces qui sont en jeu. Pour ce faire, il faut considérer l'ensemble du système aérien et souterrain impliqué dans le processus. Les forces qui tendent à faire basculer l'arbre sont les suivantes (Bouchon 1987) (figure 1):

- la poussée due au vent;
- le poids de la partie aérienne.

La poussée due au vent variera selon la vitesse du vent, la surface de la cime exposée au vent, sa perméabilité et sa flexibilité (Cremer *et al.* 1982).

Les forces qui s'opposent au renversement peuvent se décomposer de la manière suivante:

- la résistance du sol au cisaillement : par ses caractéristiques, le sol oppose une résistance à la fracture de la motte de terre;
- la résistance à la tension et à l'arrachement des racines du côté d'où vient le vent (côté amont);
- le poids de la motte composée des racines et de la terre qui les entoure;

- la résistance des racines en flexion et en compression du côté opposé au vent (côté aval).

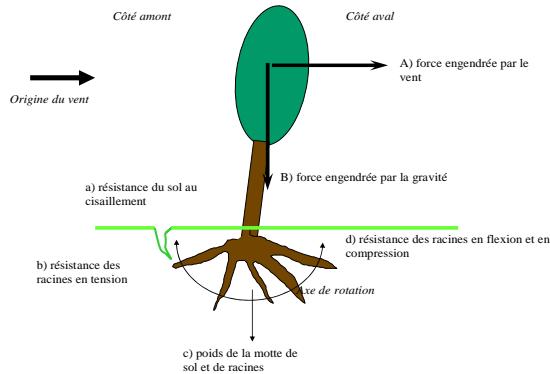


Figure 1

Figure 1. Représentation des forces favorisant ou s'opposant au renversement des arbres (D'après Bouchon 1987).

Durant une tempête, le sommet de l'arbre se déplace en décrivant une trajectoire elliptique. Tous les côtés de la tige et du système racinaire sont ainsi sollicités tour à tour (Mergen 1954). Tant que les mouvements sont faibles, les racines jouent peu et la résistance du sol au cisaillement représente la principale force s'opposant à l'arrachement (Coultts 1983; Bouchon 1987). Pour des mouvements plus importants, la résistance des racines devient importante. Du côté aval, les racines sont soumises à des forces de flexion et de compression contre le sol sous-jacent alors que, du côté amont, elles sont plutôt soumises à des forces de tension et de cisaillement (Coultts 1983). Le bois vert est en général plus résistant en tension qu'en compression de sorte que l'enracinement du côté aval joue un rôle particulièrement important (Mergen 1954). Puisque la poussée du vent nécessaire pour provoquer le renversement de l'arbre est en général supérieure à la résistance du sol au cisaillement, une fracture peut se produire et les racines peuvent être endommagées sans que l'arbre soit abattu. Ces blessures peuvent ensuite servir de portes d'entrée pour la carie et

elles contribuent à affaiblir l'arbre face à un coup de vent ultérieur (Bouchon 1987; Smith *et al.* 1987; Rizzo et Harrington 1988).

Cette description s'applique lorsque la résistance de la tige est supérieure à celle des forces assurant l'ancrage. Dans le cas inverse, une rupture de la tige surviendra (Schaeztl *et al.* 1989). Le risque de bris est alors fonction de la densité du bois et de la forme de la tige (Putz *et al.* 1983). Le bris peut survenir à peu près à n'importe quel niveau de la tige puisque les contraintes se répartissent généralement de façon assez uniforme le long de la tige (Cremer *et al.* 1982; King 1986).

L'arbre dispose de certains mécanismes d'adaptation aux contraintes exercées par le vent. La répartition du bois le long de la tige peut ainsi être modifiée de façon à uniformiser la répartition des contraintes (Mattheck 1991). L'ancrage de l'arbre dans le sol peut être amélioré et la forme ainsi que la dimension de la cime peuvent être modifiées de façon à réduire la surface offerte à l'action du vent (Mergen 1954; Putz *et al.* 1983; Urban *et al.* 1994). Il a aussi été démontré que la forme transversale des racines pouvait être ajustée pour maximiser la résistance pour une même quantité de matériel (Quine *et al.* 1995). Les racines tendent ainsi à prendre la forme d'une poutre en I dans les stations exposées (Quine *et al.* 1995; Wood 1995; Nicoll et Ray 1996).

La situation dans un peuplement fermé peut différer grandement de celle d'un arbre ayant poussé à découvert. Ainsi, dans un peuplement fermé, la vitesse peut n'atteindre que 25% de celle à plein découvert (Smith *et al.* 1987), réduisant ainsi la pression exercée sur la cime. De plus, dans un peuplement, l'énergie du vent peut être dissipée par le contact avec les arbres voisins (Somerville 1980).

FACTEURS INFLUENÇANT LE RISQUE DE CHABLIS

Le risque de chablis dépend de l'interaction de nombreux facteurs liés au climat, à la topographie, aux caractéristiques du sol et du peuplement, ainsi qu'aux interventions sylvicoles. Différentes combinaisons de facteurs peuvent être associées à un niveau élevé de risques.

Facteurs climatiques

Les dommages causés par le vent peuvent revêtir un caractère catastrophique ou endémique. Dans le premier cas, les dommages résultent de tempêtes extrêmement intenses. Dans le second cas, particulièrement en forêt boréale, ils prennent la forme de pochettes de chablis qui s'étendent au cours des ans. En forêt feuillue, les renversements seraient beaucoup plus rares et plutôt isolés. Bien que les dommages de nature catastrophique soient plus spectaculaires, ceux de nature endémique ne sont pas à dédaigner et peuvent même être plus sérieux (Holt *et al.* 1965; Savill 1983; Rollison 1987). C'est d'ailleurs sur ce type de dommages que le sylviculteur est susceptible d'exercer le plus d'influence (Miller 1985).

Il est particulièrement difficile d'établir une vitesse moyenne à partir de laquelle le vent est susceptible d'occasionner des dommages. Dans le centre-nord de l'Ontario, le chablis survenu sur une période de 30 ans était associé à des vents de plus de 60 km/h (Smith *et al.* 1987). Selon Ruel *et al.* (2000b), les vitesses critiques seraient de l'ordre de 70-90 km/h pour des sapinières mûres sur station mésique. Dans l'Ouest du Québec, une augmentation des dommages a été observée dans des peuplements d'épinette noire soumis à la coupe par bandes à la suite d'une tempête où les vents ont approché les 90 km/h (Ruel 1989; Ruel 1990).

La vitesse horaire moyenne ne constitue toutefois pas un bon indicateur de la force du vent puisque

celle-ci fluctue entre des accalmies et des rafales et que c'est plutôt cette alternance qui est responsable des dommages observés (Savill 1983). Au cours des rafales, la vitesse du vent peut être de 40 % à 50% supérieure à la vitesse horaire moyenne (Busby 1965; Smith *et al.* 1987). L'importance des rafales varie selon la hauteur et l'espacement entre les arbres (Gardiner *et al.* 1997). Ces rafales sont en fait associées à des phénomènes de turbulence découlant de l'interaction du vent, du couvert forestier et de la topographie. La turbulence est un phénomène présentant un certain caractère aléatoire (Savill 1983). Cette nature aléatoire peut expliquer qu'en certaines occasions la direction de la chute des arbres ne correspond pas à la direction des vents associés à la tempête à l'origine des dégâts. Cette turbulence peut aussi causer des dommages du côté du peuplement opposé à celui d'où vient le vent (Robertson 1987).

La direction des vents influence aussi l'ampleur des dommages. Des vents provenant d'une direction inhabituelle risquent ainsi de causer des dommages plus sérieux que des vents de même force mais correspondant à la direction habituelle des vents (Robertson 1987). Moore (1977) considère que la direction des vents de tempête joue un rôle plus déterminant que celle des vents dominants.

La durée de la tempête peut aussi influencer l'importance des dommages. En effet, dans le cas de tempêtes prolongées, l'ancrage du système racinaire peut être progressivement affaibli de sorte que le renversement peut survenir même si les vents n'atteignent pas une valeur critique (Cremer *et al.* 1982). Dans une étude de treuillage, des différences entre une application statique d'une force et son application de façon cyclique ont été attribuées à un affaiblissement progressif du système racinaire (O'Sullivan et Ritchie 1993).

L'abondance des précipitations dans la période précédant l'épisode venteux peut aussi avoir une importance. Ainsi, l'humidité du sol sera plus élevée après des pluies abondantes, ce qui réduit la qualité de l'ancrage. Des dommages plus élevés surviennent souvent dans ces conditions (Moore 1977).

Topographie

Les variations locales de la direction et de la force du vent associées à la topographie sont particulièrement importantes en foresterie car elles déterminent largement le degré d'exposition au vent. En effet, selon la topographie, la force du vent et par conséquent le risque de chablis peuvent être augmentés ou réduits. La réaction du vent face à un obstacle s'apparente en fait à celle de l'écoulement de l'eau : il accélère lorsqu'il traverse un passage rétréci et devient turbulent à sa sortie ou lorsqu'il passe par-dessus un obstacle (Moore 1977).

Le passage au-dessus d'une crête de montagne augmente la turbulence et la vitesse du vent. Cette augmentation sera dépendante de l'altitude de la crête, de la pente des flancs ainsi que de l'angle avec lequel le vent frappe la montagne. Ruel *et al.* (1998) ont observé que la vitesse au sommet des montagnes d'un secteur du Bouclier Canadien était approximativement le double de celle au fond des vallées.

Lorsque le vent souffle dans l'axe de la vallée, il tend aussi à la suivre et sa vitesse augmente, surtout lorsqu'il souffle du bas vers le haut de la vallée (Ruel *et al.* 1998). Il y a aussi augmentation de sa vitesse et de sa turbulence lorsque se présente un rétrécissement de la vallée (Moore 1977; Ruel *et al.* 1998). Les risques de chablis peuvent aussi être augmentés à la rencontre de deux tributaires ou encore lorsque la vallée change de direction (Moore 1977).

Lorsque le vent traverse au-dessus d'une vallée encaissée, les risques de chablis sont en général

assez faibles dans la vallée elle-même puisque le vent ne tend pas à redescendre le long de pentes supérieures à 50 ou 70% (Moore 1977; Steinblums 1978). Un élargissement local de la vallée peut toutefois affecter grandement la pénétration du vent dans la vallée. La vitesse peut alors doubler sur de courtes distances (figure 2) (Ruel *et al.* 1998). Des changements importants de direction, pouvant atteindre 50° par rapport à la direction d'origine, sont aussi observés lorsque le vent souffle perpendiculairement à la vallée (Ruel *et al.* 1998).

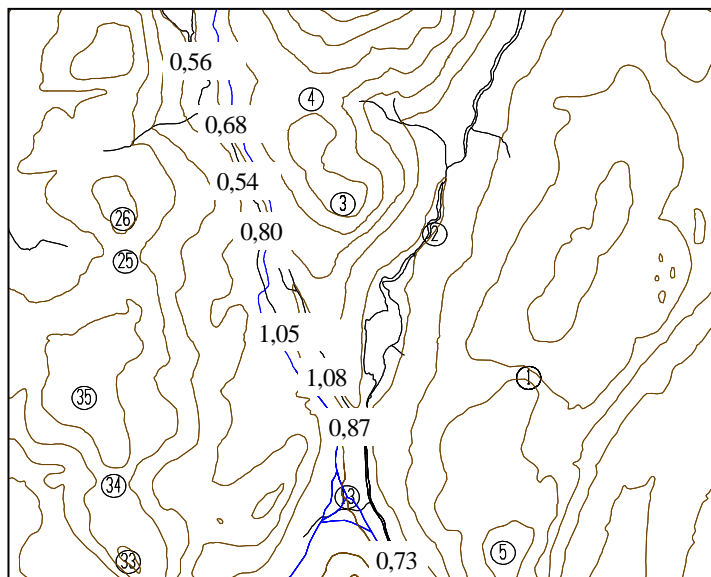


Figure 2. Facteur d'accélération des vents d'Ouest pour un secteur de la réserve faunique des Laurentides (Ruel et Pin 1999).

Configuration du système racinaire et propriétés du sol

La capacité d'un arbre à résister au renversement dépend de son système racinaire, des propriétés du sol ainsi que du lien entre le sol et les racines (Cremer *et al.* 1982).

La configuration du système racinaire a une influence sur la capacité de l'arbre à résister au renversement bien que beaucoup de travaux restent à faire dans ce domaine (Savill 1983).

Un système racinaire en coeur serait particulièrement efficace par sa capacité à retenir une masse de terre importante (Schutz 1990). Selon Mergen (1954), les racines qui permettent aux arbres de résister sont surtout les racines courtes, trapues, obliques ou horizontales. Les racines fines peuvent aussi jouer un rôle, pas en augmentant la résistance racinaire, mais plutôt en augmentant la masse de sol retenue par les racines (Mergen 1954). En ce sens, un système pivotant ne constitue pas nécessairement un gage de stabilité puisque, pour soutenir un arbre d'une trentaine de mètres, il faudrait pouvoir compter sur un pivot de diamètre comparable à celui mesuré à hauteur de poitrine et ce, sur une profondeur de 3 m! (Mergen 1954; Busby 1965). Il peut néanmoins apporter une contribution significative. Ainsi, Hintikka (1972) a observé que la force requise pour incliner d'un degré la tige de pins sylvestres (*Pinus sylvestris* L.) avec pivot était plus du double de celle requise pour l'épinette de Norvège (*Picea abies* L.) de même taille et sur le même sol mais ne possédant pas de pivot.

La rigidité du système racinaire peut être assimilée à celle d'une poutre de section circulaire. La rigidité de cette dernière est reliée à la quatrième puissance de son diamètre. Ainsi, si la poutre se divise en deux parties de même dimension et dont la surface transversale totale correspond à celle de la première partie, la rigidité se trouvera réduite de moitié (Coutts 1983). Cette situation se retrouve souvent au niveau des principaux embranchements du système racinaire. Une subdivision des racines du côté aval a ainsi pour effet de rapprocher la charnière autour de laquelle bascule la motte de terre, en réduisant la taille et l'inertie qu'elle oppose au renversement. Coutts (1983) et Mergen (1954) ont d'ailleurs observé que le renversement était souvent associé au bris de racines du côté opposé au vent, particulièrement aux embranchements. De l'autre côté, les racines sont souvent arrachées du sol puisque la résistance des racines en tension est plus grande

(Busby 1965). Selon Busby (1965), le développement d'un système racinaire résistant par l'ajout de bois de compression du côté opposé au vent pourrait être favorisé chez les résineux par l'action du vent. Les arbres croissant en peuplement serré peuvent toutefois présenter une certaine résistance à l'action du vent par leurs racines entrelacées.

Les caractéristiques du sol affectent la résistance au chablis en influençant le développement du système racinaire de même que la résistance du sol au cisaillement et la cohésion entre le sol et les racines. Le développement du système racinaire est grandement influencé par l'aération du sol, la résistance du sol à la pénétration des racines et sa capacité de rétention en eau (Mergen 1954). Une faible épaisseur du sol, la présence d'une couche indurée ou d'une nappe phréatique élevée peuvent contribuer à un enracinement superficiel (Mueller et Cline 1959; Lieffers et Rothwell 1987; Schaetzel *et al.* 1989).

La résistance du sol au cisaillement est dépendante de la texture et de l'humidité du sol (Busby 1965; Coutts 1983). La résistance au cisaillement décroît des sols sableux aux sols argileux, de même qu'avec une augmentation de la teneur en eau (Busby 1965). Ainsi, Hintikka (1972) a observé que la force requise pour incliner une tige d'épinette de Norvège sur sol sableux était environ le double de celle requise sur un sol argileux.

Certaines régions de l'Est du Canada sont caractérisées par des sols présentant des limitations physiques à l'enracinement. Par exemple, des gleysols ou des sols organiques mal drainés dominent une bonne partie de la ceinture argileuse de l'Est de l'Ontario et de l'Ouest du Québec (Smith *et al.* 1987; Robitaille et Saucier 1998). De même, les dépôts de moins de 25 cm constituent le principal dépôt pour une bonne partie de la Côte-Nord (Robitaille et Saucier 1998).

Facteurs liés au peuplement

Composition spécifique

Les espèces diffèrent quant à leur vulnérabilité au chablis mais la majorité de l'information quantitative provient de l'Europe. Les feuillus disposeraient d'un meilleur enracinement et leur vulnérabilité serait nettement réduite à la suite de la chute des feuilles. Ruel (2000) a observé que le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) était moins vulnérable que le sapin (*Abies balsamea* (L.) Mill.) ou l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.).

Puisque les feuillus sont généralement moins affectés, l'information disponible traite surtout des résineux (Savill 1983). Burns et Honkala (1990) considèrent que les pins sont généralement plus résistants alors que les épinettes et les sapins seraient plus vulnérables, l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss) l'étant moins que le sapin ou l'épinette noire. McClintock (1954) considère le sapin plus vulnérable que l'épinette rouge (*Picea rubens* Sarg.). Dans l'analyse d'un chablis catastrophique survenu dans deux régions du Québec, Ruel et Benoit (Ruel et Benoit 1999) ont observé que l'importance des dommages augmentait avec la proportion de sapin dans une des régions mais pas dans l'autre. Ruel *et al.* (2000a) ont constaté que l'épinette blanche avait subi moins de dommages que le sapin se retrouvant dans les mêmes peuplements en milieu riverain.

Le développement du système racinaire n'est pas uniquement fonction de l'espèce mais aussi des caractéristiques édaphiques. De plus, les différentes espèces ne réagissent pas toutes de façon identique à un même facteur limitant potentiellement l'enracinement (Busby 1965). Il est ainsi relativement difficile d'établir une classification de la sensibilité relative au chablis puisque les espèces à comparer se retrouvent souvent sur des sols totalement différents (Busby 1965; Bouchon 1987).

Hauteur et âge du peuplement

Les dommages causés par le vent augmentent généralement avec la hauteur du peuplement (Elling et Verry 1978; Cremer *et al.* 1982; Savill 1983; Smith *et al.* 1987; Ruel 1989; Ruel *et al.* 2000b). Cette augmentation des dommages s'explique en bonne partie par une augmentation du moment de force exercé à la base de l'arbre avec l'allongement du bras de levier que constitue le tronc (Cremer *et al.* 1982). La plus grande flexibilité des jeunes tiges pourrait aussi permettre une meilleure dissipation de l'énergie du vent par l'oscillation des tiges, réduisant ainsi les contraintes exercées au niveau du système racinaire (Busby 1965).

D'une façon générale, le risque de chablis débute surtout à partir d'une hauteur de 10 m (Busby 1965). Smith *et al.* (1987) considèrent que les peuplements d'épinette noire sur stations tourbeuses dans la zone argileuse de l'Ontario devraient être récoltés avant qu'ils n'atteignent 20 ou 21 m puisqu'ils deviennent alors vulnérables à des vents revenant à tous les dix ans (Figure 3). Ruel *et al.* (2000b) ont estimé que la vitesse susceptible d'occasionner des dommages dans les sapinières mésiques passait de 109 km/h pour une hauteur de 10 m à 65 km/h pour une hauteur de 19 m.

On observe quelquefois une relation entre l'âge du peuplement et l'importance des pertes par chablis. Cette relation peut découler en partie d'une augmentation de la hauteur avec l'âge lorsque de jeunes peuplements sont inclus dans l'échantillon (Fleming et Crossfield 1983; Ruel 1989). Ruel et Benoit (1999) ont observé que le niveau de dommages augmentait entre 50 et 70 ans dans les sapinières. Ruel *et al.* (2000b) ont estimé que le risque de chablis sur les stations appartenant à la première classe de productivité (IQS de 15 m à 50 ans) (Boudoux 1978) augmentait surtout entre 70 et 75 ans lorsque la vitesse annuelle moyenne du vent était de 15 km/h.

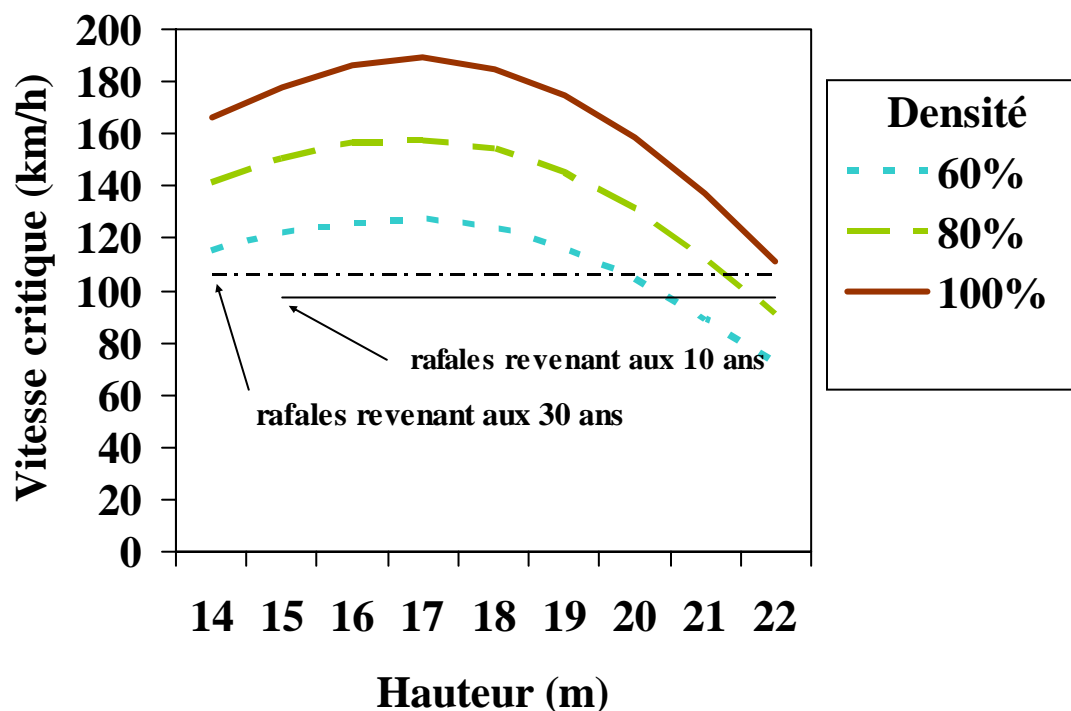


Figure 3. Vitesse critique des vents pouvant occasionner le renversement d'épinettes noires sur station tourbeuse en fonction de la hauteur et de la densité relative par rapport aux tables normales. La force des rafales correspondant à des fréquences de retour de 1 dans 10 et de 1 dans 30 ans est aussi illustrée (D'après Smith *et al.* 1987).

Tableau 1. Quelques facteurs du milieu associés au risque de chablis.

Facteurs climatiques:	- force et direction des vents - durée de la tempête - abondance des précipitations
Topographie:	- canalisation des vents - accélération des vents
Sol et système racinaire:	- configuration du système racinaire - texture et drainage du sol
Peuplement:	- composition - hauteur et forme des tiges - densité - état de santé

L'effet de l'âge pourrait aussi découler d'une détérioration de l'état de santé lorsqu'un peuplement dépasse le stade de maturité.

La présence de caries du tronc augmentera le risque de bris de tiges alors que la carie de racines augmentera le risque de renversement (Fraser 1962; Gordon 1973; Smith *et al.* 1987;

Schaetzl *et al.* 1989; Whitney 1989). Whitney (1976) considère le sapin comme particulièrement vulnérable aux caries de racines alors que l'épinette blanche serait moins sensible que cette espèce ou l'épinette noire. L'incidence des caries de racines augmente avec l'âge, particulièrement chez le sapin (Whitney 1989). Elle peut aussi être augmentée par la défoliation par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Whitney 1976), ce qui pourrait entraîner le renversement des peuplements défoliés (Morin 1990). Whitney (1976) propose de récolter le sapin avant 66 ans pour éviter que les pertes par chablis attribuables aux caries de racines ne deviennent trop importantes. Silva *et al.* (1998) ont constaté que la présence de fentes chez des sapins déjà cariés venait réduire davantage leur résistance mécanique.

Forme des tiges et de la cime

La forme des tiges a aussi souvent été reliée à leur résistance au renversement ou à la rupture (Cremer *et al.* 1982; Bouchon 1987; De Champs 1987). Un faible élancement, estimé par le rapport entre la hauteur et le diamètre de la tige moyenne ou des 200 plus gros arbres à l'hectare, permettrait d'augmenter la résistance de l'arbre au bris de tiges (Cremer *et al.* 1982) mais pourrait aussi être associé à un meilleur enracinement (De Champs 1987). Ce faible élancement conduit à une augmentation de la masse de la tige pour une même hauteur et cette masse est très fortement corrélée à la résistance au renversement (Ruel *et al.* 2000b). Des travaux en cours laissent à penser que la plus grande résistance de l'épinette blanche au renversement par rapport au sapin de même hauteur au sein d'un même peuplement serait attribuable à une forme différente des tiges.

La longueur de la cime peut aussi influencer la stabilité des arbres en abaissant leur centre de gravité, réduisant ainsi la longueur du bras de levier. L'augmentation de la force exercée par le vent sur une cime de plus fortes dimensions fera

toutefois plus que contrebalancer cet effet de sorte que la stabilité relative d'arbres dont la cime est développée découle plutôt de leur croissance dans des conditions exposées continuellement à la lumière et à l'action des vents. Cette situation leur a alors permis de développer une forme de tronc et un système racinaire adéquats (Busby 1965).

Densité et structure du peuplement

La densité du peuplement a aussi été identifiée comme variable importante. Elle influence en effet la forme des arbres et du système racinaire, de même que le mouvement de l'air à travers et au-dessus du peuplement (Gardiner *et al.* 2000). Dans un peuplement clair, la croissance en diamètre sera meilleure sans que la croissance en hauteur ne soit nécessairement affectée. Le facteur d'élancement sera alors plus faible et la formation de racines de support pourrait être favorisée (Cremer *et al.* 1982). La force exercée sur chacune des tiges d'un peuplement ouvert peut toutefois être supérieure à celle observée dans un peuplement dense. Des peuplements denses peuvent aussi demeurer stables si aucune intervention n'y est pratiquée car l'énergie du vent peut alors être dissipée par un plus grand nombre de cimes et l'oscillation des arbres peut être réduite par le contact entre les tiges (Becquey et Riou-Nivert 1987). L'entrelacement des racines peut aussi contribuer à améliorer la stabilité dans ces conditions (Busby 1965; Cremer *et al.* 1982). Smith *et al.* (1987) considèrent ainsi que la stabilité augmente avec la densité du peuplement dans le cas de peuplements d'épinette noire sur stations tourbeuses où le substrat présente des conditions mécaniques peu favorables.

L'effet de la structure du peuplement est beaucoup plus difficile à évaluer. En fait, des avis divergents existent quant aux avantages d'une structure inéquienne. La structure inéquienne aurait l'avantage de n'exposer qu'une partie du peuplement au risque de chablis. Cette

exposition serait toutefois continue tout au long de la vie du peuplement. La stabilité des arbres les plus hauts dépendra alors de leur capacité à développer un système racinaire adéquat (Busby 1965). L'influence de la structure du peuplement sur les mécanismes de dispersion d'énergie est de plus mal connu (Savill 1983).

CONSIDÉRATIONS SYLVICOLES

Le sylviculteur, par son action sur les forces favorisant le déracinement de l'arbre ou encore s'y opposant, peut avoir un impact considérable sur l'importance des dommages causés par le vent. Ceci est vrai pour l'ensemble des interventions pratiquées dans la vie d'un peuplement. Cet impact touche la stabilité soit des arbres pris individuellement, soit du peuplement en entier.

Régénération artificielle et traitements associés

Lorsqu'on a recours à la régénération artificielle, certaines mesures peuvent être prises pour réduire la vulnérabilité du futur peuplement. Lorsqu'une couche indurée limite la profondeur d'enracinement, un travail intensif du sol pourrait améliorer la stabilité du peuplement (Savill 1983). Le drainage pourrait avoir un effet semblable (Fraser 1962; Bouchon 1987) s'il permet aux racines de traverser la tourbe pour atteindre le sol minéral (Busby 1965). Selon DeChamps (1987), la fertilisation pourrait apporter une contribution positive à la stabilité du peuplement en améliorant l'enracinement et en diminuant l'élancement. Cependant, Laiho (1987) a constaté que les peuplements récemment fertilisés étaient plus vulnérables au chablis. En dépit de leur potentiel pour augmenter la résistance au déracinement, de telles mesures ne joueront probablement pas un rôle majeur dans la prochaine décennie pour l'Est du Canada, compte tenu de la sylviculture extensive qui y est pratiquée.

La qualité des plants et les méthodes de plantation pourraient aussi influencer la répartition des racines et, de ce fait, la résistance au renversement (Savill 1983). Le choix d'une espèce capable de développer un bon système racinaire sur un type donné de station représente un autre moyen de réduire les risques éventuels de chablis dès l'installation de la régénération. Toutefois, les conditions de sol et de climat typiques de la forêt boréale de l'Est du Canada limitent le choix des essences, de sorte que l'épinette noire représente 40% des superficies reboisées dans cette région (Kuhnke 1989).

Puisque la forme des tiges dépend des conditions de croissance, on pourrait être tenté de modifier la densité de plantation pour réduire la vulnérabilité des plantations au chablis. Quine *et al.* (1995) estiment que cette stratégie a peu d'impact pour des densités de plantation d'épinette de Sitka (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) comprises entre 1500 et 3000 plants à l'hectare.

Réduction de la compétition

La réduction de la compétition dans les jeunes peuplements peut avoir un effet bénéfique sur l'enracinement, la forme des arbres et leur résistance au renversement (Savill 1983; De Champs 1987). Le dépressage devrait être effectué avant que la compétition n'ait irrémédiablement altéré la forme des tiges (Becquey et Riou-Nivert 1987). Selon Cremer *et al.* (1982), les valeurs maximales d'élancement atteintes dépendent des conditions de compétition en jeune âge et, une fois que l'élancement a atteint des valeurs élevées, des éclaircies risquent d'avoir peu d'effet sur cette variable.

Éclaircie

L'augmentation du risque de chablis à la suite d'une éclaircie commerciale est un phénomène bien connu (Busby 1965; Savill 1983). L'éclaircie a pour effet de permettre au vent de pénétrer à l'intérieur du peuplement, d'augmenter

la rugosité du couvert et par conséquent la turbulence (Cremer *et al.* 1982). La pression exercée par le vent sur chaque tige peut alors doubler et les chances de dissiper cette énergie par le contact entre les cimes sont brutalement réduites (Cremer *et al.* 1982; Savill 1983). Cette augmentation de la vulnérabilité pourrait durer de 2 à 5 ans, jusqu'à ce que le couvert commence à se refermer (Cremer *et al.* 1982; Savill 1983), ou encore se poursuivre sur une quinzaine d'années, c'est-à-dire jusqu'à ce que les structures de soutien de l'arbre aient pu s'adapter aux nouvelles conditions (Busby 1965). La durée de la période de stabilisation dépendra du rythme de croissance, de l'âge et de l'état du peuplement au moment de l'éclaircie (Cremer *et al.* 1982). Les dommages sont ainsi particulièrement importants lorsque l'éclaircie est récente (Bouchon 1987).

Les modalités de l'éclaircie sont aussi à considérer. Des éclaircies tardives dans des peuplements âgés, impliquant des tiges hautes et élancées ont un effet particulièrement néfaste (Savill 1983). Pour une sapinière productive modérément exposée (vitesse annuelle moyenne=10 km/h), le risque de dommages associé à une éclaircie récoltant 35% des tiges augmenterait rapidement après 70 ans (figure 4). Pour une station semblable mais davantage exposée au vent, le risque augmenterait graduellement à partir de 45 ans (Ruel *et al.* 2000b). De même, une éclaircie récoltant 45% du nombre de tiges serait à proscrire sur des stations exposées. Elle comporterait aussi des risques importants dans des peuplements de plus de 60 ans sur des stations modérément exposées (figure 4) (Ruel *et al.* 2000b). D'importantes pertes ont ainsi été observées à la suite d'éclaircies réalisées dans des sapinières, particulièrement lorsque les peuplements avaient autour de 70 ans ou que le prélèvement dépassait 40% de la surface terrière (Hatcher 1961). Holt *et al.* (1965) rapportent des dommages considérables à la suite d'éclaircies pratiquées dans des sapinières de la péninsule

gaspésienne.

Selon Cremer *et al.* (1982), une éclaircie par le bas serait préférable à une par le haut puisque les dominants sont généralement moins élancés. Busby (1965) considère toutefois qu'une éclaircie par le haut pourrait avoir un effet bénéfique sur la circulation de l'air et la dissipation de l'énergie du vent et, de ce fait, être préférable à une éclaircie par le bas.

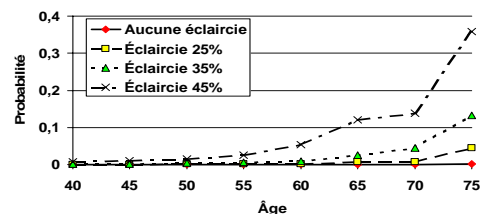


Figure 4. Effet de l'intensité d'éclaircie (% du nombre de tiges) sur le risque annuel de chablis dans des sapinières mésiques (Indice de qualité de station : 15 m à 50 ans; vitesse annuelle moyenne du vent : 10 km/h) (D'après Ruel *et al.* 2000b).

Coupe à blanc

Les coupes totales sont susceptibles d'engendrer des chablis à leur périphérie puisque les arbres laissés s'y retrouvent exposés à des vents plus forts et plus turbulents (Dewalle 1983). Le risque associé aux nouvelles lisières dans les sapinières dépendrait de l'âge, de la qualité de station et de l'exposition au vent (figure 5) (Ruel *et al.* 2000b). Sur les stations productives exposées au vent, toute nouvelle lisière comporterait un risque élevé. Sur les stations exposées correspondant à un indice de qualité de station de 12 m à 50 ans, le risque augmenterait graduellement avec l'âge. Sur les stations moins exposées, le risque associé aux nouvelles lisières serait élevé surtout après 70 ans sur les meilleures stations alors qu'il demeurerait faible pour les stations moins productives.

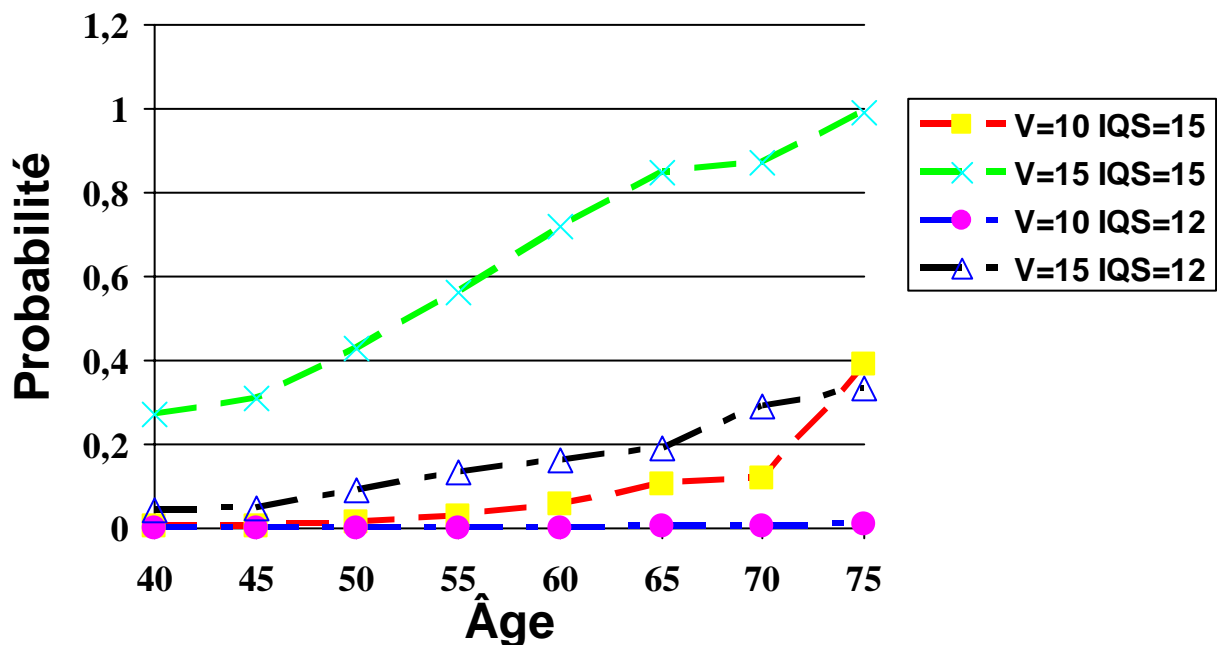


Figure 5. Effet de la création d'une nouvelle lisière sur le risque de chablis en fonction de l'indice de qualité de station (IQS : hauteur à 50 ans) et la vitesse annuelle moyenne du vent (km/h) (D'après Ruel et al. 2000b).

Afin de minimiser les dommages, la bordure de la coupe devrait être la plus régulière possible, avec le moins de changements brusques de direction (Busby 1965; Savill 1983). Des coupes à blanc de grande superficie permettraient de réduire le périmètre exposé pour une même superficie coupée (Savill 1983). Une telle approche est toutefois difficilement compatible avec une utilisation polyvalente du milieu forestier. De plus, Steinblums (1978) a constaté que les dommages dans certaines lisières augmentaient avec la profondeur de la coupe dans la direction critique des vents. Selon Busby (1965), une stabilisation graduelle des lisières autour de trouées causées par le chablis pourrait survenir à l'intérieur d'une quinzaine d'années. L'orientation de la lisière exercera alors une influence déterminante sur le niveau de pertes (Gordon 1973). Une possibilité pour la réduction des pertes serait de conduire la régénération contre le vent (Busby 1965).

Lors de la réalisation de coupes à blanc, on conserve souvent des lisières boisées entre deux parterres de coupe ou encore le long du réseau hydrographique afin de réduire certains impacts de ce mode de coupe. Cette approche a pour effet d'exposer un périmètre important à l'action des vents. Dans des conditions peu exposées au vent, ces lisières résisteront assez bien alors que, dans des conditions exposées, les pertes par chablis pourront être considérables (Steinblums et al. 1984; Ruel et al. 2000a). C'est ainsi que, pour des bandes riveraines de 60 m situées dans certaines conditions plus exposées de la réserve faunique des Laurentides (voir exposition des stations à la figure 2), on a constaté que les pertes pouvaient dépasser 30% du volume marchand dès la première année alors que certaines bandes de 20 m n'étaient à peu près pas affectées. Les pertes moyennes observées dans cette étude variaient entre 23 et 43% après 9 ans (figure 6). Elles étaient

davantage affectées par la topographie locale que par la largeur de la bande (Ruel *et al.* 2000a).

Coupe à blanc par bandes

La coupe à blanc par bandes aura aussi pour effet d'augmenter le périmètre exposé pour une même superficie coupée. Cet effet sera d'autant plus important que les bandes sont étroites. Ainsi, pour l'épinette noire, Fleming et Crossfield (1983) ont observé des mortalités particulièrement importantes lorsque la largeur était inférieure à 40 m. Pour trois régions du Québec (Abitibi, Mauricie, Lac-Saint-Jean) où une étude de chablis fut effectuée, on a constaté de fortes variations de mortalité pour des peuplements d'épinette noire soumis à la coupe par bandes de 60 m, la mortalité moyenne pour une région pouvant atteindre 20 à 30 % après 5 ans (Ruel 1989; Ruel 1990). Dans cette étude, l'importance des pertes a pu être reliée au drainage, à la hauteur du peuplement ainsi qu'à l'orientation des bandes. Ainsi, on a constaté que, pour une des régions, la mortalité après 4 ans variait entre 9 et 94% selon l'orientation. Avec ce mode de coupe, les pertes pourraient être réduites par un choix judicieux des peuplements et de l'orientation des bandes ainsi qu'en réduisant autant que possible l'intervalle séparant la coupe de deux bandes adjacentes.

Jardinage

Busby (1965) considère que le jardinage par pied d'arbre permettrait le maintien de la stabilité du peuplement. Le jardinage par groupes pourrait présenter les mêmes avantages en autant que les groupes demeurent de petites dimensions. McLintock (1954) a observé des pertes relativement faibles dans les quelques années qui ont suivi des coupes jardinatoires dans des peuplements inéquiennes de sapin et d'épinette rouge. Il présente aussi certaines recommandations quant aux modalités permettant de limiter les dommages. Toutefois,

l'utilisation de cette pratique sera quelque peu limitée par la structure généralement équienne des peuplements résineux de l'Est du Canada.

PRÉVISION DES RISQUES

Les sections précédentes ont démontré que le niveau de pertes après l'application d'un traitement sylvicole varie, non seulement avec la nature du traitement, mais aussi avec le risque inhérent à la station. Il devient alors important de préciser ce risque.

Système britannique d'évaluation du risque de chablis

La Grande-Bretagne a un climat particulièrement venteux par rapport au reste de l'Europe et même par rapport à la majorité du globe, ce qui explique que des recherches intensives sur le chablis y ont été entreprises dès le début des années soixante (Quine *et al.* 1995). En 1977, leur première version d'un système opérationnel permettant l'évaluation du risque de chablis a vu le jour. Ce système fait d'abord appel à une division de la Grande-Bretagne en sept zones correspondant à des conditions de vent distinctes (Miller 1985; Miller *et al.* 1987). L'altitude est aussi utilisée pour tenir compte d'une augmentation régionale de la force du vent avec l'altitude.

La topographie locale a un impact considérable sur le degré d'exposition aux vents. Pour en tenir compte, le système britannique utilise une variable synthèse, le Topex qui estime le degré de protection accordé par le relief avoisinant. Cette variable est obtenue en faisant la somme de l'angle d'élévation de la ligne d'horizon dans chacune des huit directions principales de la boussole (Miller 1985). Elle ne considère toutefois pas la direction des vents dominants. On a néanmoins constaté de bonnes relations entre le Topex et des mesures d'exposition au vent (Miller *et al.* 1987; Ruel *et al.* 1997).

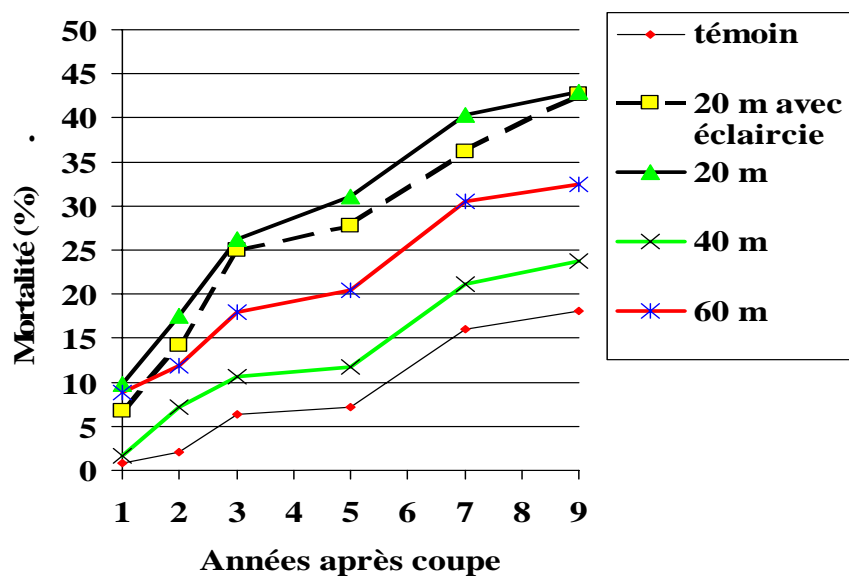


Figure 6. Évolution de la mortalité dans des bandes riveraines de la sapinière à bouleau blanc (Ruel et Pin 1999).

Tableau 2. Quelques actions du sylviculteur pouvant modifier le risque de chablis.

Choix des espèces à régénérer	- possibilité de privilégier des espèces à enracinement profond
Contrôle précoce de la densité	- permet de conserver une meilleure forme des tiges
Préparation de terrain	- pourrait dans certains cas améliorer la qualité de l'enracinement
Éclaircie	- augmente temporairement le risque de chablis, en particulier dans des peuplements non éduqués en jeune âge
Coupe à blanc, coupe par bandes	- augmente le risque de chablis en périphérie des zones coupées

Afin d'intégrer l'effet des caractéristiques édaphiques, un système de cotes a été établi pour les principaux groupes de sol. Cette cote tient principalement compte des contraintes que pose le sol à l'enracinement. Un ajustement de

la cote est aussi proposé pour certaines caractéristiques spécifiques (Miller 1985).

Une valeur synthèse est ensuite compilée à partir de ces différentes évaluations. La valeur

compilée sert à attribuer à un secteur l'une des six classes de vulnérabilité que l'on retrouve dans le système. A chaque classe peut être associée une hauteur critique qui tient compte du régime d'éclaircie. La hauteur critique est définie comme celle à laquelle les pertes par chablis sont susceptibles de dépasser 3 p. 100. Ces hauteurs ont été définies uniquement pour l'épinette de Sitka et elles varient de 9 à 28 m pour les différentes combinaisons de vulnérabilité et d'éclaircie.

Plus récemment, des améliorations ont été proposées au système. Les zones de vent ont été redéfinies (Quine et White 1993). Les cotes attribuées à l'altitude et au Topex ont été révisées. Une cote supplémentaire, tenant compte de l'orientation de la pente et des effets de canalisation, a été introduite.

L'information obtenue devrait permettre de procéder à une coupe finale avant que la hauteur du peuplement n'atteigne une valeur l'exposant à des dommages sérieux. Elle peut aussi orienter le choix d'un régime d'éclaircie. Rollison (1987) propose ainsi trois options, allant d'aucune éclaircie jusqu'à des éclaircies retardées, selon la classe de vulnérabilité.

Malgré les imperfections de ce système (Quine et Reynard 1990), il pourrait former la base d'un système adapté pour l'Est du Canada. Une carte des vitesses annuelles moyennes est disponible pour le Québec (Figure 7) (Walmsley et Morris 1994). Le potentiel éolien du Québec a aussi été cartographié (Québec 1997). Quant à l'effet de la topographie, une modification du Topex a prouvé son efficacité et pourrait permettre de cartographier automatiquement l'exposition au vent (Ruel *et al.* 1997; Quine et White 1998). Il s'agit de limiter la distance à l'intérieur de laquelle les éléments topographiques sont examinés et de permettre ainsi des angles négatifs. Cette dernière approche a permis de cartographier l'exposition au vent pour la Forêt Montmorency de l'Université Laval (figure 8). Les travaux de

Smith *et al.* (1987) pourraient être utilisées pour dériver des hauteurs critiques pour l'épinette noire sur stations mal drainées. Des travaux examinant la résistance du bouleau jaune et du peuplier faux-tremble ont aussi été réalisés, sans toutefois qu'un lien soit fait avec la vitesse de vent susceptible d'occasionner des dommages (Silva *et al.* 1998). Des travaux réalisés pour le sapin baumier permettraient d'établir une hauteur critique sur station mésique (Ruel *et al.* 2000b).

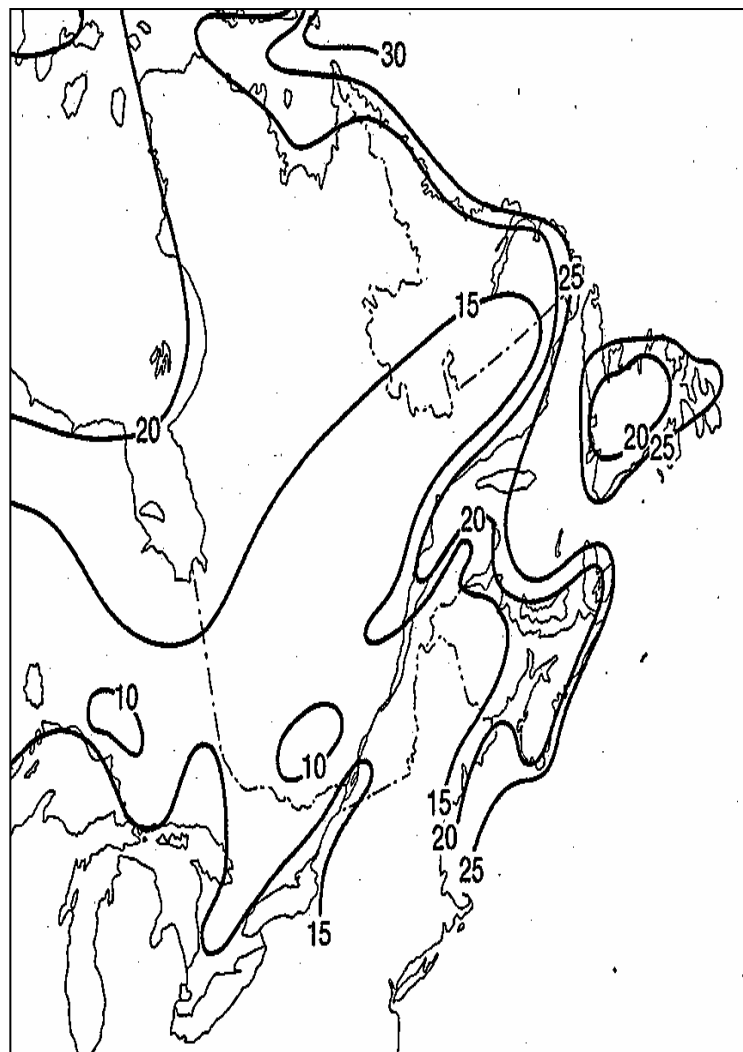


Figure 7. Carte des vitesses annuelles moyennes de vent pour le Québec (D'après Walmsley et Morris 1994).

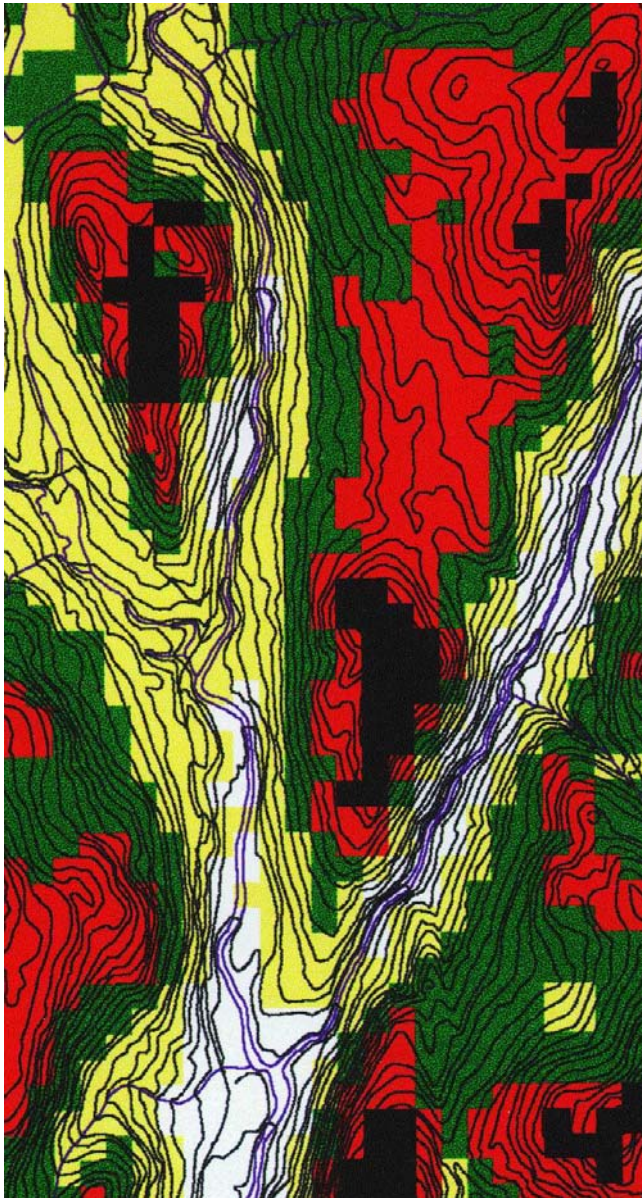


Figure 8. Carte des expositions au vent de la Forêt Montmorency dressée à l'aide d'une modification du Topex.

Blanc : Station abritée
 Jaune : Station très abritée
 Rouge : Station modérément exposée
 Vert : Station exposée
 Noir : Station très exposée

Évaluation à partir des données dendrométriques

L'importance du facteur d'élancement (H/D) sur la résistance au chablis a amené plusieurs auteurs à utiliser cette variable comme indice de vulnérabilité (Cremer *et al.* 1982; Becquey et Riou-Nivert 1987; Bouchon 1987).

En France, Becquey et Riou-Nivert (1987) ont défini trois zones de stabilité pour l'épinette de Norvège et le sapin pectiné (*Abies alba* L.) en fonction de la hauteur et du facteur d'élancement (figure 9). Dans la zone de stabilité, une éclaircie forte est possible, sans trop encourir de risques. Elle correspond à des arbres trapus ou de faible hauteur. La résistance du peuplement au renversement est alors due à une bonne résistance des tiges individuelles. Dans la zone intermédiaire, les caractéristiques des tiges ne leur permettent pas de résister individuellement. La stabilité du peuplement est alors dépendante d'un "effet de bloc" permettant la dispersion de l'énergie du vent. Une éclaircie forte dans cette zone peut alors avoir un effet désastreux. Dans la zone d'instabilité, l'effet de bloc ne permet plus d'assurer la stabilité du peuplement. Si le vent est assez fort pour amorcer le chablis, c'est alors tout le peuplement qui peut être ravagé.

Au cours de sa vie, le peuplement passe successivement de la zone de stabilité à la zone intermédiaire puis éventuellement à celle d'instabilité. Le rythme de progression entre ces zones peut toutefois être influencé par la sylviculture. Becquey et Riou-Nivert (1987) proposent ainsi deux types de sylviculture:

- une sylviculture très énergique avec des dépressages en jeune âge;
- une sylviculture sans éclaircie si on estime que le peuplement peut se maintenir dans la zone intermédiaire jusqu'à la récolte.

Bouchon (1987) a présenté des valeurs critiques d'élanement pour l'épinette de Norvège qui tiennent compte de la densité du couvert, de certaines propriétés du sol et de la présence de pourritures.

Malgré l'intérêt de cette approche, l'exposition d'un peuplement au vent ainsi que les caractéristiques du sol sont peu considérées. De plus, les seuils délimitant les zones de stabilité pourraient varier selon l'espèce et le climat même si Becquey et Riou-Nivert (1987) ont obtenu des résultats intéressants avec d'autres espèces. L'extrapolation aux conditions québécoises sans adaptation préalable demeure toutefois risquée.

Observations locales

Certains indices existent sur le terrain quant au degré d'exposition au vent et par conséquent au risque de chablis. La présence de tiges renversées et une microtopographie formée de buttes et de dépressions témoigne de la présence de chablis plus ou moins récents (Moore 1977). L'orientation des tiges renversées peut constituer un indice quant à la direction des vents susceptibles de causer des dommages (Steinblums 1978; Ruel et Pin 1993).

Les caractéristiques des arbres peuvent aussi fournir certaines informations. En effet, l'action du vent sur les arbres peut induire certaines modifications. À Terre-Neuve, Robertson (1991) a ainsi pu relier la présence de bois de compression avec la direction des vents. Robertson (1986; 1987) a aussi établi une relation entre les déformations de la cime du mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch) ainsi que l'asymétrie du tronc et la force moyenne et la direction des vents. Dans le cas de la forme de la cime du mélèze, un indice de déformation est calculé à partir d'une photographie de l'arbre. Cet indice permet ensuite une estimation de la vitesse moyenne des vents (Robertson 1987).

Cette relation a rendu possible la cartographie des vents dans un secteur d'étude.

Les caractéristiques du tronc pourraient être utilisées comme indice en terrain plat mais seraient moins fiables en terrain accidenté à cause de l'impact de la pente sur la formation de bois de compression (Robertson 1986). Quant à la forme de la cime, l'effet du vent s'exprime surtout sur des arbres isolés ou poussant au-dessus du couvert principal, en présence de vents suffisamment forts pour engendrer des modifications de forme. Ces exigences risquent de limiter l'utilisation de cette approche dans plusieurs peuplements résineux continentaux où le couvert est assez homogène et les conditions de vent, moins rigoureuses que celle du climat maritime ayant servi au développement de ces indices.

Évaluation à partir de données d'inventaire écologique

L'impact des caractéristiques du milieu sur les risques de chablis a amené certains auteurs à proposer des systèmes d'évaluation basés sur les résultats d'inventaires écologiques (Meades et Moore 1989; Racey *et al.* 1989; Zelazny *et al.* 1989). Ces systèmes considèrent surtout l'impact des caractéristiques édaphiques sur le système racinaire et sur la résistance mécanique du sol à l'arrachement. Certains tiennent aussi compte de la composition du peuplement sur pied (Racey *et al.* 1989). Meades et Moore (1989) considèrent un certain effet de la topographie, mais celui-ci ne s'applique qu'en conditions maritimes. Corns et Annas (1984) incluent l'exposition au vent comme facteur explicatif, sans toutefois identifier de méthode objective pour l'estimer (Corns, communication personnelle).

En Colombie-Britannique, une approche combinant les données d'inventaire écologique et des indices locaux de terrain a été proposée (Mitchell 1995; Mitchell 1998). La première étape consiste à identifier les patrons de

chablis observables sur le terrain. Un facteur de risque est ensuite attribué au traitement sylvicole susceptible d'être appliqué puis une cote est attribuée au risque associé aux facteurs biophysiques (topographie, peuplement, sols). Une intégration des différentes cotes est ensuite faite et calibrée à partir d'observations de chablis dans le secteur considéré. Stathers *et al.* (1994) ont produit un guide permettant d'intégrer cette approche dans la planification des interventions sylvicoles.

Modèles numériques d'estimation du risque

Une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans la vulnérabilité au chablis a rendu possible l'élaboration de modèles numériques d'estimation du risque de chablis. L'adresse suivante permet de prendre connaissance des travaux réalisés en Europe : <http://bamboo.mluri.sari.ac.uk/aair-home.html/>.

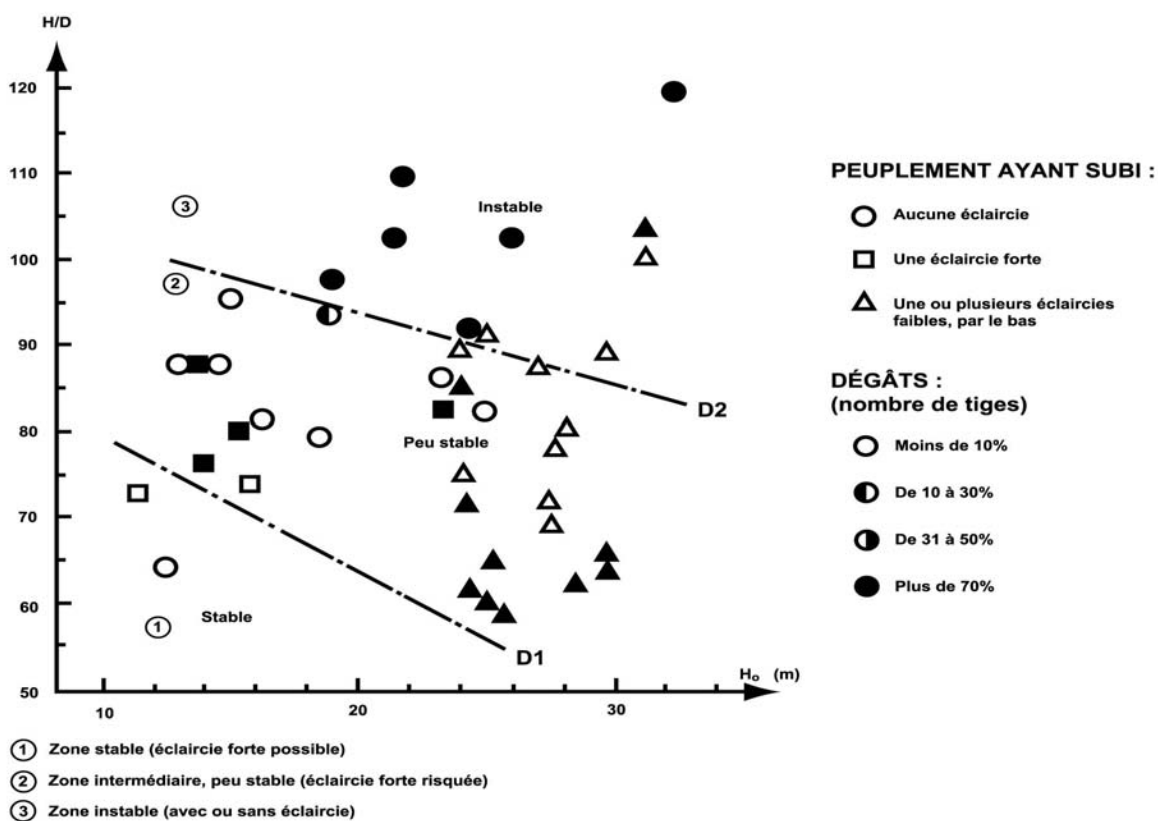


Figure 9. Importance des dégâts causés par le vent en fonction de la hauteur dominante (H_0), du facteur d'élanement (H/D) et des interventions sylvicoles. Les droites D1 et D2 représentent les limites entre les différentes zones de stabilité pour l'épinette de Norvège et le sapin pectiné (D'après Becquey et Riou-Nivert 1987).

Le modèle Hwind a été développé en Finlande pour le pin sylvestre, l'épinette de Norvège et le bouleau (Peltola et Kellomaki 1993; Peltola et al. 1995; Peltola *et al.* 1999). Le modèle prédit le moment de flexion critique et la vitesse du vent à laquelle les arbres à la lisière des forêts seront déracinés ou cassés. Le calcul de la résistance au renversement est prédite en utilisant des estimés du poids de la plaque formée par le sol et les racines. La résistance à la rupture se base sur les modules de rupture pour les différentes espèces.

Le modèle ForestGales a été développé par les Britanniques en vue de remplacer leur système de classification du risque de chablis (Quine et Gardiner 1998). Ce modèle calcule la vitesse nécessaire à la rupture ou au déracinement de la tige moyenne d'un peuplement puis estime la probabilité que cette valeur soit dépassée. L'estimation de la résistance au renversement se base sur la relation spécifique entre la masse de la tige et le moment critique mesuré lors d'études de treillage. La résistance au bris s'appuie sur les valeurs de module de rupture pour chaque espèce. Cette probabilité sera affectée par l'exposition au vent de la station, elle-même fonction du climat régional et de la topographie.

Ce modèle a été comparé avec le précédent et les résultats se sont avérés cohérents (Gardiner et al. 2000). Il a été adapté pour le sapin baumier par Ruel *et al.* (2000b). La méthode d'estimation d'exposition au vent utilisée par ce modèle (DAMS score) (Quine et White 1993) est toutefois difficilement applicable à l'Est du Canada. Les auteurs ont plutôt utilisé une relation entre la vitesse moyenne et l'indice servant à décrire l'effet de la topographie pour l'appliquer aux sapinières. La vitesse moyenne peut être estimée à partir de la carte des vitesses moyennes du vent (Walmsley et Morris 1994) (figure 7) et de la connaissance de l'effet de la topographie (figure 8) (Ruel *et al.* 1997; Ruel *et al.* 1998).

CONCLUSION

Le chablis a de tout temps été présent dans nos écosystèmes. De par sa nature partiellement aléatoire, il continuera assurément à y jouer un rôle. Une bonne compréhension des mécanismes associés au renversement fournit cependant une base d'information à partir de laquelle on peut tenter de réduire les pertes. Bien que d'importants travaux restent à faire, particulièrement dans le contexte du nord-est américain, certaines informations sont d'ores et déjà disponibles. On sait ainsi que les peuplements les plus hauts ou encore ceux croissant sur des sols à nappe phréatique élevée présentent des risques de renversement plus importants. Dans de telles conditions, la coupe par bandes, l'éclaircie ou la création de lisières pourront avoir des conséquences néfastes si la station est fortement exposée aux vents. L'effet de la densité sur la forme des tiges met aussi en évidence l'intérêt d'un contrôle précoce de la densité. Le maintien du peuplement dans de bonnes conditions de santé constitue un autre facteur dont on saisit aisément l'importance. Le niveau d'exposition au vent pourrait être estimé à partir de la topographie en utilisant un système d'information à référence spatiale (Quine 1995).

Le succès du sylviculteur dans sa démarche de réduction des pertes engendrées par le chablis résidera dans sa capacité de retenir l'information pertinente à son milieu mais surtout à bien considérer les différents facteurs en interaction. Il s'agit d'une tâche complexe mais à laquelle il faut s'attaquer si l'on ne consent pas à considérer le chablis comme une fatalité à laquelle on ne peut se soustraire. Le développement de modèles numériques constitue un domaine prometteur.

BIBLIOGRAPHIE

- BECQUEY, J. et P. RIOU-NIVERT 1987. L'existence de zones de stabilité des peuplements. Conséquences sur la gestion. *Revue forestière française* 39: 323-334.
- BOUCHON, T. 1987. État de la recherche relative aux dégâts forestiers dûs aux tempêtes. *Revue Forestière Française* 39: 301-312.
- BOUDOUX, M. 1978. Tables de rendement empiriques pour l'épinette noire, le sapin baumier et le pin gris au Québec. Gouvernement du Québec, Min. Terres et Forêts. 101 pp.
- BURNS, R.M. et B.H. HONKALA 1990. *Silvics of North America. USDA For. Serv., Agr. Handbook 654, Vol. 1 Conifers.* 675 p.
- BUSBY, J.A. 1965. Studies on the stability of conifer stands. *Scottish For.* 19: 86-102.
- CORNS, I.G.W. et R.M. ANNAS 1984. Ecological classification of Alberta forests and its application to forest management. *In Forest classification at high latitudes as an aid to regeneration. USDA For. Serv. Pac. Northwest For. and Range Exp. Stn. gen. tech. rep. PNW-177.* 40-52 pp.
- COUTTS, M.P. 1983. Root architecture and tree stability. *Plant and soil* 71: 171-188.
- CREMER, K.W., C.J. BOROUGH, F.H. MCKINNEL et P.P. CARTER 1982. Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *N. Zeal. J. For. Sci.* 12: 245-268.
- DE CHAMPS, J. 1987. Mesures sylvicoles préventives. *Revue Forestière Française* 39: 313-322.
- DEWALLE, D.R. 1983. Wind damage around clearcuts in the ridge and valley province of Pennsylvania. *J. For.* 81: 158-172.
- ELLING, A.E. et E.S. VERRY 1978. Predicting wind-caused mortality in strip cut stands of peatland black spruce. *For. Chron.* 54: 249-252.
- FLEMING, R.L. et R.M. CROSSFIELD 1983. Strip cutting in shallow-soil upland black spruce near Nipigon. Windfall and mortality in the leave strips: Preliminary results. *Can. For. Serv., Great Lakes For. Res. Cent., Information Rep. O-X-354.*
- FRASER, A.I. 1962. The soil and the roots as factors in tree stability. *Forestry* 35: 117-127.
- GARDINER, B., H. PELTOLA et S. KELLOMAKI 2000. The development and testing of models to predict the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological modelling* In press.
- 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.
- GORDON, D.T. 1973. Damage from wind and other causes in mixed white fir-red fir stands adjacent to clearcuttings. *USDA, For.Ser. Pac. Southwest For. and Range Exp. Stn., PSW-90.* 22 p.
- GRAYSON, A.J. 1987. The 1987 storm impacts and responses. *Forestry commission bulletin* 87.

- HATCHER, R.J. 1961. Partial cutting balsam fir stands on the Epaule River watershed, Quebec. Can. Dept. For., For. Res. Branch, Tech. Note no 105. 29 p.
- HINTIKKA, V. 1972. Wind-induced root movements in forest trees. Comm. Inst. Forest. Fenn. 56 pp.
- HOLT, L., A. LINTEAU, P.H. TREMBLAY et W.L. JOHNSON 1965. Some aspects of balsam fir management. Pulp and Paper Mag. Can. : WR322-WR338.
- KING, D.A. 1986. Tree form height growth and susceptibility to wind damage in *Acer saccharum*. Ecology 67: 980-990.
- KUHNKE, D.H. 1989. Statistiques sylvicoles canadiennes: résumé couvrant une période de 11 ans. Forestry Canada, Northern For. Cent., Inf. Rep. NOR-X-301F.
- LAIHO, O. 1987. Susceptibility of forest stands to windthrow in Southern Finland. Folia Forestalia 706: 23-24.
- LIEFFERS, V.J. et R.L. ROTHWELL 1987. Rooting of peatland black spruce and tamarack in relation to depth of water table. Can. J. For. Res. 65: 817-821.
- MATTHECK, C. 1991. Trees. The mechanical design. Springer-Verlag, Berlin. 121 pp.
- MCCLINTOCK, T.F. 1954. Factors affecting wind damage in selectively cut stands of spruce and fir in Maine and northern New Hampshire. USDA For. Serv. North. For. Exp. Stn., Station Paper no.70.
- MEADES, W.J. et J. MOORE 1989. A field guide to the Damman forest types of Newfoundland. Forest site classification Manual. FRDA report 003.
- MERGEN, F. 1954. Mechanical aspects of wind breakage and wind-firmness. Journal of Forestry 52.
- MILLER, K.F. 1985. WINTHROW hazard classification. , Forestry commission leaflet 85.
- MILLER, K.F., C.P. QUINE et J. HUNT 1987. The assessment of wind exposure for forestry in upland Britain. Forestry 60: 179-192.
- MITCHELL, S. 1998. A diagnostic framework for windthrow risk estimation. For. Chron. 74: 100-105.
- MITCHELL, S.J. 1995. The windthrow triangle: a relative windthrow hazard assessment procedure for forest managers. For. Chron. 71: 446-450.
- MOORE, M.K. 1977. Factors contributing to blowdown in streamside leave strips on Vancouver island. B.C. Min. For. Land Manage., Rep. 3.
- MORIN, H. 1990. Analyse dendro écologique d'une sapinière issue d'un chablis dans la zone boréal (Québec). Can. J. For. Res. 20: 1753-1758.
- MUELLER, O.P. et M.G. CLINE 1959. Effects of mechanical soil barriers and soil wetness on rooting of trees and soil mixing by blowdown in central New York. Soil Science 88: 107-116.
- NICOLL, B.C. et D. RAY 1996. Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. Tree Physiology 16: 891-898.
- O'SULLIVAN, M.F. et R.M. RITCHIE 1993. Tree stability in relation to cyclic loading. Forestry 66: 69-82.

PELTOLA, H. et S. KELLOMAKI 1993. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fennica* 27: 99-111.

PELTOLA, H., S. KELLOMAKI, H. VAISANEN et V.-P. IKONEN 1999. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Can. J. For. Res.* 29: 647-661.

PELTOLA, H., M.L. NYKANEN et S. KELLOMAKI 1995. 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. *For. Ecol. Manage.* 95: 229-241.

PUTZ, F.E., P.D. COLEY, K. LU, A. MANTALVO et A. AIELLO 1983. Uprooting and snapping of trees: structural determinants and ecological consequences. *Can. J. For. Res.* 13: 1011-1020.

QUÉBEC, M.R.N. 1997. L'énergie au service du Québec. Une perspective de développement durable. Ministère des Ressources Naturelles, Pub. RN97-4018.

QUINE, C., M. COUTTS, B. GARDINER et G. PYATT 1995. Forest and winds: management to minimise damage. Forestry commission, Bull. 114.

QUINE, C. et B. GARDINER 1998. ForestGales-Replacing the windthrow hazard classification. Forestry Commission Research Agency, Forest research Annual report and accounts 1997-98.

QUINE, C.P., P. BELL, A. MACKIE 1995. Use of geographic information systems in windthrow studies. Forestry Commission report on forest research 1995 : 37-38.

QUINE, C.P. et B.R. REYNARD 1990. A new series of windthrow monitoring areas in upland Britain. Forestry commission, occasional paper 25.

QUINE, C.P. et WHITE 1993. Revised windiness scores for the windthrow hazard classification: the revised scoring method. Forestry Commission, Res. Inf. Note 230.

QUINE, C.P. et M.S. WHITE 1998. The potential of distance-limited topex in the prediction of site windiness. *Forestry* 71: 325-332.

RACEY, G.D., T.S. WHITFIELD et R.A. SIMS 1989. Northwestern Ontario forest ecosystem interpretations. Ont. Min. Nat. Res., NWOFTDU tech. rep. 46.

RIZZO, D.M. et T.C. HARRINGTON 1988. Root movement and root damage of red spruce and balsam fir on subalpine site in the White Moutnains, New Hampshire. *Can. J. For. Res.* 18: 991-1001.

ROBERTSON, A. 1986. Estimating mean windflow in hilly terrain from tamarack (*Larix laricina*(Du Roi)K. Koch) deformation. *Int. J. Biometeor* 30: 333-349.

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

ROBERTSON, A. 1991. Centroid of wood density, bole eccentricity and tree-ring width in relation to vector winds in wave forests. *Can. J. For. Res.* 21: 73-82.

ROBITAILLE, A. et J.-P. SAUCIER 1998. Paysages régionaux du Québec méridional. Publications du Québec, . 213 pp.

ROLLISON, T.J.D. 1987. Thinning control of conifer plantation in Great Britain. *Ann. Sci. For.* 44: 25-34.

- RUEL, J.-C. 1989. Mortalité du bois laissé sur pied à la suite d'une coupe par bandes dans trois régions du Québec. *For. Chron.* 65: 107-113.
- RUEL, J.-C. 1990. Étude de quelques aspects de la coupe par bandes dans les peuplements d'épinette noire. M.E.R. du Québec, Direction de la recherche, note de recherche forestière 40.
- RUEL, J.-C. 1992. La sylviculture face au risque de chablis. *Aubelle* 88.
- RUEL, J.-C. 1995. Understanding windthrow: silvicultural implications. *For. Chron.* 71: 443-445.
- RUEL, J.-C. 2000. Factors influencing windthrow in balsam fir forests: from landscape studies to individual tree studies. *For. Ecol. Manage.* in press.
- RUEL, J.-C. et R. BENOIT 1999. Analyse du chablis du 7 novembre 1994 dans les régions de Charlevoix et de la Gaspésie, Québec, Canada. *For. Chron.* 75: 293-301.
- RUEL, J.-C. et D. PIN 1993. Windthrow along electrical distribution lines in a rural setting. *Journal of Arboriculture* 19: 271-277.
- Ruel, J.-C. et D. PIN 1999. Chablis dans les bandes riveraines: effets de la largeur de la bande et de l'éclaircie. *Aubelle* 129: 12-15.
- RUEL, J.-C., D. PIN et K. COOPER 1998. Effect of topography on wind behaviour in a complex terrain. *Forestry* 71: 261 - 265.
- RUEL, J.-C., D. PIN et K. COOPER 2000a. Windthrow in riparian buffer strips: effect of wind exposure, thinning and strip width. *For. Ecol. Manage.* in press.
- RUEL, J.-C., D. PIN, L. SPACEK, K. COOPER et R. BENOIT 1997. The estimation of wind exposure for windthrow hazard rating: comparison between Strongblow, MC2, Topex and a wind tunnel study. *Forestry* 70: 253-265.
- RUEL, J.-C., C.P. QUINE, S. MEUNIER et J. SUAREZ 2000b. Estimating windthrow risk in balsam fir stands with the ForestGales model. *For. Chron.* In press.
- SAVILL, P.S. 1983. Silviculture in windy climate. *For. Abstracts*, review article 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. *Can. J. For. Res.* 19: 1-11.
- SCHUTZ, J.P. 1990. *Sylviculture 1. Principes d'éducation des forêts.* Presses polytechniques et universitaires romandes. 243 pp.
- SILVA, G., J.-C. RUEL, M. SAMSON et D. PIN 1998. Influence de quelques défauts externes sur la résistance des arbres à une simulation mécanique de l'action du vent. *Can. J. For. Res.* 28: 123 - 131.
- SMITH, V.G., M. WATTS et D.F. JAMES 1987. Mechanical stability of black spruce in the Clay Belt of northern Ontario. *Can. J. For. Res.* 17: 1080-1091.
- SOMERVILLE, A. 1980. Wind stability: forest layout and silviculture. *New Zeal. J. For. Sci.* 10: 476-501.
- STATHERS, R.J., T.P. ROLLERSON et S.J. Mitchell 1994. *Windthrow handbook for British Columbia forests.* B.C. Min. For., Working Pap. 9401. 31 p.

STEINBLUMS, I.J. 1978. Streamside buffer strips: survival effectiveness and design. M.Sc., Oregon state University.

STEINBLUMS, I.J., H.A. FROELICH et J.K. LYONS 1984. Designing stable buffer strips for stream protection. *J.For.* 82: 49-52.

STEPHENS, E.P. 1956. The uprooting of trees: A forest process. *Soil Sci. Soc. Proc.* 20: 113-116.

URBAN, S.T., V.J. LIEFFERS et S.E. MACDONALD 1994. Release in radial growth in the trunk and structural roots of white spruce as measured by dendrochronology. *Can. J. For. Res.* 24: 1550-1556.

WALMSLEY, J.L. et R. MORRIS 1994. Cartes des ressources en énergie éolienne au Canada. Canada, Service de l'Environnement Atmosphérique, ARD-92-003-F.

WHITNEY, R.D. 1976. Root rot of spruce and balsam fir in northwestern Ontario. I Damage and implication for forest management. *Can. For.Serv., Great Lakes For. Cent., Rep. O-X-241.*

WHITNEY, R.D. 1989. Root rot damage in natural regenerated stands of spruce and balsam fir in Ontario. *Can. J. For. Res.* 19: 295-308.

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. 133-164 pp.

ZELAZNY, V.F., T.T.M. NG, M.G. HAYTER, C.L. BOWLING et D.A. BEWICK 1989. Field guide to forest site classification in New Brunswick. Harvey-Harcourt-Fundy site regions. New Brunswick Dept. Nat. Res. and Energy.

F O R M A T I O N



continue

NOM : _____ No de permis : _____

Cours no 23 – La sylviculture face au risque de chablis.

QUESTIONNAIRE ET FEUILLE-RÉPONSES

- Les racines du côté opposé d'où vient le vent (côté aval) jouent un rôle particulièrement important dans la résistance au renversement.
VRAI
FAUX
- Parmi les facteurs climatiques suivants, lesquels ont un impact sur le risque de renversement arbres?
A) la force du vent
B) sa direction
C) sa turbulence
D) les deux premières réponses
E) l'ensemble des trois facteurs
- L'exposition au vent est fortement influencée par la topographie.
VRAI
FAUX
- La résistance d'un arbre au renversement dépend:
A) de la configuration du système racinaire
B) des propriétés du sol
C) du lien entre le sol et les racines
D) les deux premières réponses
E) l'ensemble des trois facteurs
- Quel est l'effet d'une augmentation de la hauteur des arbres sur le risque de chablis?
A) il augmente
B) il diminue
C) aucun effet
- Quel est l'effet d'une augmentation de l'élanement (rapport H/D) sur le risque de chablis?
A) il augmente
B) il diminue
C) aucun effet
- Pour une sapinière productive (IQS=15 m à 50 ans) modérément exposée (vitesse annuelle moyenne de 10 km/h), quelle éclaircie conduirait au risque de chablis le plus élevé?
A) éclaircie de 45% du nombre des tiges à 65 ans
B) éclaircie de 35% du nombre des tiges à 70 ans
C) éclaircie de 25% du nombre de tiges à 75 ans

8. Quels sont, parmi les suivantes, la ou les mesures qui pourraient réduire les pertes par chablis dans des peuplements d'épinette noire soumis à la coupe par bandes?

- A) réduire la largeur des bandes à 20 m
- B) orienter les bandes en fonction des vents susceptibles d'engendrer des dommages
- C) réduire la période d'attente entre la coupe de deux bandes adjacentes
- D) la deuxième et la troisième réponse
- E) toutes les réponses

9. Parmi les facteurs suivants, lequel ou lesquels font partie du système britannique d'évaluation du risque de chablis?

- A) climat régional
- B) exposition locale aux vents
- C) élancement des tiges
- D) les deux premiers
- E) tous ces facteurs

10. Parmi les facteurs suivants susceptibles d'affecter le risque de chablis, lequel ou lesquels font généralement partie des systèmes d'évaluation du chablis à partir des données d'inventaire écologique?

- A) texture du sol
- B) drainage
- C) exposition au vent
- D) les deux premiers
- E) les trois