

---

L'orniérage dans les coupes partielles  
Revue de littérature

---

Évelyne Thiffault

pour le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec

---



---

L'orniérage dans les coupes partielles  
Revue de littérature

---

Évelyne Thiffault, ingénieure forestière, Ph. D.

pour le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec  
Direction de l'environnement et de la protection des forêts

Québec, mars 2008



## Pour plus de renseignements

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune  
Direction des communications  
5700, 4<sup>e</sup> Avenue Ouest, bureau B-302  
Québec (Québec) G1H 6R1  
Téléphone : 418 627-8600 ou 1 866 CITOYEN  
1 866 248-6936

Télécopieur : 418 643-0720  
Courriel : [service.citoyens@mrnf.gouv.qc.ca](mailto:service.citoyens@mrnf.gouv.qc.ca)  
Site Internet : [www.mrnf.gouv.qc.ca](http://www.mrnf.gouv.qc.ca)

Cette publication, conçue pour une impression recto verso, est disponible uniquement dans Internet à l'adresse suivante : [www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissance-activités-sol.jsp](http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissance-activités-sol.jsp).

© Gouvernement du Québec  
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2008  
Dépôt légal — Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2008  
ISBN : 978-2-550-51909-6 (PDF)

**Référence** : Thiffault, É., 2008. *L'orniérage dans les coupes partielles – Revue de littérature*, Québec, pour le ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 37 p.

**Mots clés** : coupe partielle, dommages aux racines, forêt, orniérage, Québec, revue de littérature, sol.

**Key words** : forest, literature review, partial cutting, Quebec, root damage, rutting, soil.



## Table des matières

Introduction .....	1
1. L'orniérage .....	3
2. Les impacts de l'orniérage .....	3
2.1 Dommages au sol .....	3
2.2 Dommages aux arbres résiduels.....	4
2.3 Dommages aux racines.....	5
3. Les conséquences des dommages aux racines .....	6
3.1 Qualité du bois .....	6
3.2 Vigueur et résistance des arbres aux perturbations.....	7
3.3 Croissance des arbres .....	9
4. Les normes et la réglementation concernant l'orniérage et les blessures aux racines.....	12
4.1 Ontario .....	12
4.2 Suède.....	13
4.3 Québec.....	14
Annexe A Description des recherches sur les perturbations du sol en Ontario (en anglais).....	17
Annexe B Document sur les normes et règlements canadiens sur les perturbations du sol (en anglais).....	19
Bibliographie .....	31
Tableau 1 Répartition des racines selon la profondeur du sol et le type d'écosystème.....	8
Tableau 2 Critères d'évaluation des blessures infligées aux racines lors d'une coupe partielle.....	15
Figure 1 Croissance relative prévue à la suite des dommages causés au sol et aux racines.....	11



## Introduction

Au Québec, le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) a intégré à sa Loi sur les forêts (L.R.Q., c. F-4-1) des objectifs de protection et de mise en valeur des ressources du milieu forestier (OPMV). Ceux-ci devront faire partie des plans généraux d'aménagement forestier de 2008-2013. L'un de ces objectifs est de réduire l'orniérage dans les parterres de coupe de régénération.

Pour évaluer la situation, le MRNF a mis au point un indicateur d'orniérage. Grâce aux résultats du suivi de cet indicateur, le MRNF peut rendre compte de l'état de la situation et donner aux industriels forestiers des cibles d'amélioration en matière de réduction de l'orniérage sur leur territoire de coupe.

L'indicateur d'orniérage n'est évalué que dans les coupes de régénération où le couvert est absent après l'intervention (coupe avec protection de la régénération et des sols, coupe par bandes et coupe progressive d'ensemencement finale). Il n'est pas mesuré dans les coupes partielles, car la méthode de mesure ne s'y prête pas. En effet, les ornières doivent être visibles sur les photos aériennes utilisées lors de la première étape de classement des secteurs de coupe selon leur degré d'orniérage. Or, à la suite des consultations publiques sur les OPMV, le MRNF s'est engagé à étudier l'orniérage et, plus précisément, ses impacts potentiels dans les coupes partielles.

La publication du présent document fait suite à cet engagement. Il s'agit d'une revue de littérature sur les impacts de l'orniérage dans les coupes partielles et les conséquences des dommages aux racines. On y trouve aussi un chapitre sur les normes et la réglementation en vigueur au Canada et ailleurs dans le monde.



## 1. L'orniérage

L'orniérage se définit comme le creusement du sol résultant du passage unique ou répété au même endroit des roues ou des chenilles de la machinerie forestière. Au Québec, une perturbation en sol minéral est qualifiée d'ornière lorsqu'elle dépasse 20 cm de profondeur dans la partie minérale ou sous le seuil d'enracinement, et qu'elle mesure au moins 4 m de longueur. En sol organique, on considère qu'il y a orniérage si le tapis végétal est déchiré ou si l'ornière est plus profonde que le seuil d'enracinement (Schreiber, Jetté et Auger, 2002). Les critères de qualification des ornières sont néanmoins variables selon les provinces ou États. À titre d'exemple, en Colombie-Britannique, la longueur minimale d'une ornière est la plus courte de toutes les provinces canadiennes, soit 2 m, pour 30 cm de largeur et une profondeur de 5 à 15 cm selon la sensibilité du site (B.C. Ministry of Forests 2001).

L'orniérage est généralement causé par un mouvement latéral et vers le haut du sol créé sous le pneu ou la chenille d'une machine. Il se produit lorsque la portance du sol ne permet pas de supporter la charge associée au passage de l'engin forestier. L'ornière peut aussi être causée par le compactage du sol - c'est-à-dire l'accroissement de la densité apparente du sol et la réduction de sa porosité - qui peut se produire sur les côtés et dans le fond de l'ornière, si le niveau d'humidité du sol est près de la capacité au champ<sup>1</sup>. La formation d'une ornière peut être accompagnée d'un déplacement du sol par plasticité (*puddling*) qui détruit la structure du sol et réduit la macroporosité par l'effondrement de l'agrégat (Arnup, 1998). Quand le niveau d'humidité approche du point de saturation du sol, les risques de compactage diminuent, mais la sensibilité du sol à l'orniérage par plasticité augmente (Greacen et Sands, 1980). À mesure que l'humidité du sol baisse en dessous de la capacité au champ, la résistance mécanique du sol augmente, ce qui a pour effet de diminuer le risque potentiel de compactage (Miller et autres, 2004).

À l'échelle d'un parterre de coupe, la formation d'ornières diminue le taux d'infiltration du sol, et peut ainsi causer des accumulations d'eau. La modification des propriétés hydrologiques du site peut perturber l'écoulement de l'eau, et aussi faire remonter la nappe phréatique. Cela peut entraîner une diminution de la disponibilité de microsites favorables à l'établissement de la régénération, ainsi qu'une réduction de la productivité future du site (Grigal, 2000).

La situation de l'orniérage est un peu différente dans les coupes partielles, puisque seule une partie des arbres est récoltée et qu'une portion du couvert est maintenue. Dans ce cas, la formation d'ornières peut causer des dommages soit par blessure mécanique directe aux racines des arbres résiduels, soit en raison d'une modification des conditions de la zone racinaire (ex. : compactage du sol).

## 2. Les impacts de l'orniérage

### 2.1 Dommages au sol

Les opérations mécanisées de coupe partielle nécessitent que la machinerie circule régulièrement dans les peuplements forestiers. Le tracé du réseau de sentiers dans le parterre de coupe dépend de la répartition des arbres à abattre, des caractéristiques de l'abatteuse, de la productivité du débardeur et de l'attention portée à la protection des arbres résiduels. Dans de telles coupes, le réseau de sentiers mis en place est typiquement constitué de sentiers

---

1. Capacité de rétention maximale en eau du sol, lorsque le drainage naturel est terminé (c'est-à-dire que l'eau gravitationnelle a été évacuée).

secondaires, le long desquels les arbres sont récoltés, reliés aux sentiers primaires et qui sont les voies principales menant à la jetée. Comme les sentiers primaires sont soumis à un trafic intense de la machinerie, les dommages au sol y sont plus fréquents (Meek, 1997). Les déplacements du débardeur constituent la majeure partie de la circulation sur les sentiers, puisque cet engin doit effectuer plusieurs va-et-vient pour ramasser le bois.

Dans des coupes progressives et des coupes de jardinage, où les sentiers sont généralement espacés de 13 à 33 m, on a observé un sol perturbé (comportant au moins une modification physique de la couche d'humus) sur une superficie variant de 17 à 30 % du parterre de coupe (Meek, 1997; Hamilton, 1999). Dans le cas d'éclaircies commerciales par bandes, le niveau de perturbation du sol peut atteindre 37 % de la superficie (Karr et autres, 1987). Selon Hamilton (1999), par rapport à la coupe totale, les coupes partielles occasionnent une plus grande exposition du sol minéral, en raison des nombreux déplacements que doivent effectuer les débardeurs pour être chargés à pleine capacité (les abatteuses peuvent moins facilement regrouper le bois dans ce type de coupes). Cet auteur rapporte également moins de résidus au sol. La présence de résidus dans les sentiers peut réduire considérablement les dommages au sol; une épaisseur de 25 à 30 cm les prévient presque totalement (Wästerlund, 1994a).

La plupart des études suggèrent que les perturbations graves du sol qui impliquent une exposition profonde du sol minéral, comme lors de la formation d'ornières, sont peu fréquentes dans les coupes partielles. Elles sont généralement observées sur 1 à 2 % de la superficie du parterre de coupe. Toutefois, des niveaux d'orniérage jusqu'à 9 % de la superficie ont aussi été rapportés (Hamilton, 1999). C'est le cas, notamment, de coupes progressives où la circulation de la machinerie est concentrée dans un petit nombre de sentiers. Dans les secteurs de coupe de jardinage, le réseau de sentiers contient davantage de sentiers secondaires non soumis à une circulation importante et donc moins susceptibles d'être gravement perturbés. En Ontario, des ornières ont été observées dans des coupes de jardinage sur moins de 2 % du parterre de récolte. Néanmoins les sentiers très fréquentés (avec plus de 10 passages de débardeur), qui représentaient 36 % de tous les sentiers, contenaient près de 90 % des ornières importantes (Partington et Lirette, 2005). Lorsque les coupes partielles sont réalisées pendant des périodes où le taux d'humidité du sol est élevé, l'orniérage peut alors atteindre des niveaux très élevés. Karr et autres (1987) ont observé, à la suite d'un traitement d'éclaircie, des ornières sur 24 % de la superficie de peuplements occupant des sols fins et mal drainés dans des conditions humides, c'est-à-dire avec un taux d'humidité supérieur à 25 %.

## 2.2 Dommages aux arbres résiduels

D'après Nyland (1994), lors des coupes partielles, il est presque inévitable que certains dommages soient causés aux arbres des peuplements résiduels, même lorsque les conditions d'opérations sont optimales. Par exemple, Nichols et autres (1994) rapportent que de 20 à 31 % des arbres résiduels ont subi des dommages lors de coupes partielles entièrement mécanisées dans des peuplements feuillus du Maine. Au Québec, des opérations de coupe de jardinage en forêt feuillue ont causé des dommages sur 12 et 42 % des arbres résiduels alors que les sentiers étaient espacés de 33 m et 13 m respectivement (Meek, 1997). Dans sa revue de littérature, Vasiliauskas (2001) rapporte le cas de peuplements mixtes ou de conifères où des dommages causés par la machinerie lors de coupes d'éclaircies ont été répertoriés sur 4 à 21 % des tiges résiduelles. Aussi, lors d'une étude réalisée à la forêt expérimentale de Petawawa en Ontario, des coupes partielles réalisées dans des peuplements de pins blancs (*Pinus strobus* L.), et visant à libérer les arbres en sous-étage, ont causé des dommages sur 20 % des tiges d'avenir (Whitney et Brace, 1979). Ces résultats ont été obtenus malgré le soin apporté à la planification de l'abattage, ainsi qu'à la formation et à la supervision des équipes

responsables de la coupe. Lors de coupes progressives d'ensemencement, comme les arbres laissés sur pied sont plus gros et que la machinerie utilisée est généralement plus large et plus puissante, les risques de dommages au peuplement restant sont encore plus élevés. Dans des régions d'Europe où la coupe progressive et le jardinage sont pratiqués depuis longtemps, comme en Allemagne et en Autriche, on rapporte que la proportion cumulative d'arbres résiduels endommagés peut atteindre de 47 à 72 % (Vasiliauskas, 2001).

### 2.3 Dommages aux racines

Parmi les dommages pouvant être infligés aux arbres résiduels lors de coupes partielles, on compte, notamment, les dommages aux racines. Ce type de dommage correspond à une blessure ou à une rupture du système racinaire causée par des forces mécaniques, ou encore à une réduction de la croissance racinaire associée à des conditions de sol défavorables. Les dommages aux racines peuvent survenir lorsque 1) la machinerie ou les billes de bois causent de l'abrasion à la surface des racines; 2) des tiges résiduelles sont heurtées et des racines sont arrachées; 3) le sol autour des arbres est compacté par le passage de la machinerie; 4) des ornières s'enfoncent dans le système racinaire (Dey, 1994). Dans ce dernier cas, le dommage aux racines est causé par la force de cisaillement appliquée par les pneus ou les chenilles de l'engin forestier; cette force peut alors comprimer, peler ou briser la racine.

Plusieurs études ont permis de quantifier les dommages causés aux racines par les procédés de coupe partielle. Généralement, aucune distinction n'est faite en ce qui concerne les causes exactes de ces dommages (ex. : abrasion, heurt, compactage ou orniérage). Une étude exhaustive réalisée au Missouri dans des peuplements de chênes a démontré que, après des coupes partielles mécanisées, 37 % des arbres résiduels présentaient des signes du passage de la machinerie au sol (abatteuse ou débardeur) à l'intérieur de la surface couverte par leur couronne (Dwyer et autres, 2004). De plus, pour 46 % de ces arbres, des signes d'activité de la machinerie étaient observables dans un rayon équivalent à 1,5 fois leur couronne. Toutefois, moins de 1 % des arbres résiduels présentaient des dommages visibles à leur système racinaire. Les auteurs attribuent la faible fréquence des dommages aux racines au fait que les deux principales espèces composant les peuplements, le chêne blanc (*Quercus alba* L.) et le chêne noir (*Quercus velutina* L.), ont un système racinaire très profond et donc peu susceptible d'être endommagé. Nichols et autres (1994) ont étudié les impacts de divers procédés de récolte lors de coupes partielles réalisées dans des peuplements feuillus du Maine. Ils n'ont observé que très peu de dommages aux racines des arbres résiduels, tels que le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.), l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) et le frêne blanc (*Fraxinus americana* L.). Les bouleaux jaunes (*Betula alleghaniensis* Britt.) présentaient toutefois un nombre élevé de blessures aux racines en raison de leur système racinaire plus superficiel que les autres espèces étudiées.

Dans les coupes partielles en forêt résineuse, où le système racinaire des arbres est généralement plus superficiel qu'en forêt feuillue, il semble que la plupart des blessures infligées aux tiges résiduelles sont situées sur les racines ou sur le collet. À titre d'exemple, lors de coupes d'éclaircies réalisées en Scandinavie dans des peuplements d'épinettes de Norvège, près de 40 % des blessures répertoriées étaient des dommages aux racines et 26 % étaient situées au collet (Vasiliauskas, 2001).

## **Facteurs influençant l'importance des dommages**

En plus de la structure du système racinaire des différentes espèces d'arbres, d'autres facteurs peuvent influencer la prévalence de dommages causés aux racines lors d'une coupe partielle. Les opérations de récolte effectuées en hiver permettent, notamment, de limiter les dommages aux racines. Pendant cette période, le sol gelé est généralement couvert de neige et l'écorce des racines est plus solidement attachée au bois d'aubier. En effet, la résistance de l'écorce est nettement plus élevée durant l'automne et l'hiver, alors que l'arbre est en dormance, qu'elle ne l'est au printemps et en été, pendant la période de croissance active (Nyland, 1994). C'est pourquoi les blessures causées lors des coupes partielles réalisées en hiver sont souvent plus petites et moins profondes que celles survenant l'été (Vasiliauskas, 2001). En plus d'offrir une protection au sol, les coupes réalisées en hiver assurent aussi une meilleure visibilité aux opérateurs de machinerie, ce qui réduit les risques de blessures aux arbres résiduels (Nichols et autres, 1994).

En ce qui a trait aux interventions réalisées lorsque le sol n'est pas gelé, elles pourraient généralement être réalisées pendant une partie de la période estivale et le début de l'automne, ce qui correspond à la période allant de juillet à la mi-septembre (Nyland, 1994). De plus, les opérations de récolte et de débardage effectuées avec de la machinerie sur roues plutôt que sur chenilles causeraient des dommages moins importants aux racines, et ce, indépendamment des conditions du site (Ecowood Project, 2002). Dwyer et autres (2004) ont aussi noté que lorsque la planification des travaux de coupe est faite en collaboration avec les équipes de récolte et de débardage, et que les travaux eux-mêmes font l'objet d'une supervision très étroite, il est possible d'assurer des opérations de grande qualité avec un minimum de dommages. Cline et autres (1991) rapportent d'ailleurs que les principaux facteurs qui déterminent la quantité de dommages causés au peuplement résiduel lors des coupes partielles, sont l'effort investi dans la planification avant la coupe et le degré d'habileté des équipes de coupe.

## **3. Les conséquences des dommages aux racines**

### **3.1 Qualité du bois**

Les racines fines et celles de taille moyenne peuvent être écrasées ou arrachées lors du passage de la machinerie forestière. Les racines plus grosses ont une force en tension généralement suffisante pour ne pas céder sous le poids d'un engin, mais leur écorce peut être endommagée (Wästerlund, 1994a). Or, une blessure à un arbre survient quand l'écorce est abîmée, égratignée, percée ou pelée. Le bris de l'écorce déclenche généralement un mécanisme de défense chez l'arbre, qui varie selon l'espèce. À titre d'exemple, l'érable à sucre sécrète des phénols pour empêcher l'invasion de champignons dans une blessure. Cette réaction permet de sceller la blessure et, ainsi, de bloquer l'entrée de pathogènes pouvant causer la carie. Bien que ces phénols assurent la protection de l'arbre, ils peuvent toutefois entraîner une coloration brune, rougeâtre ou verdâtre du bois qui affecte sa qualité. Lorsque la blessure est en contact avec le sol, comme pour les blessures aux racines, les mécanismes de défense de l'arbre ne sont pas suffisants, car la surface blessée reste humide et constitue un terrain propice aux champignons (Anderson, 1994). La pourriture peut alors s'installer dans l'arbre, puis affecter le bois de la tige.

Les espèces non résineuses sont généralement plus facilement infectées par les champignons de pourriture que les espèces résineuses comme les pins et les mélèzes. Toutefois, certaines

espèces résineuses font exception, comme les épinettes (Aho et autres, 1983) et le sapin baumier (Castello et autres, 1995), qui sont très susceptibles à ces pathogènes. Des études suédoises réalisées dans des peuplements d'épinettes de Norvège ont d'ailleurs démontré que lorsque les racines des arbres résiduels sont endommagées par les opérations de coupe partielle, la pourriture qui pénètre dans la tige peut l'affecter sur une longueur de 1 à 4 m (Vasiliauskas, 2001). Aho et autres (1983) affirment que les blessures infligées aux racines au cours de l'exécution de coupes partielles sont presque toujours infectées, et que la progression de la pourriture est souvent plus rapide que lorsqu'il s'agit de blessures situées plus haut sur la tige. Il existe toutefois de nombreuses variations entre les espèces. Par exemple, pour l'érable à sucre et le pin blanc, les blessures aux racines ne semblent pas constituer un problème, car elles amènent rarement une coloration de la bille de pied, et ce, même 10 ans après la blessure (Ohman, 1970; Whitney et Brace, 1979; Whitney, 1991). Chez le bouleau jaune, par contre, les blessures aux racines, surtout celles survenant à moins de 1,2 m du tronc, sont des vecteurs importants de coloration et de carie dans la bille de pied (Ohman, 1970).

La pourriture du bois de la tige est considérée par plusieurs auteurs comme la conséquence la plus importante des dommages causés aux racines des arbres laissés sur pied. D'après Nyland (1994), dans les peuplements de feuillus tolérants, un dommage aux racines est important lorsque plus de 25 % de la superficie des racines est exposée à l'air ou brisée. Cet auteur précise que n'importe quelle blessure ouverte sur un arbre peut conduire à la coloration du bois présent au moment de la blessure, mais n'entraînera pas nécessairement sa pourriture. Toutefois, un dommage important a plus de 50 % des chances de causer de la pourriture au cours des 20 à 25 années suivantes, du moins en ce qui concerne les feuillus tolérants. Dans le recueil de saines pratiques d'opérations forestières publié en Europe par Ecowood Project (2002), on associe plutôt les dommages importants aux blessures survenant à moins d'un mètre du tronc et sur des racines de plus de 20 mm. Selon cet ouvrage, ces critères risquent de causer une pourriture importante du bois. Nilsson et Hyppel (1968 dans McNeel et autres, 1996) ont observé, dans des peuplements d'épinettes de Norvège, que des racines blessées situées à plus de 70 cm du tronc avaient peu de chances de créer des problèmes de carie. Les blessures infligées il y a moins de 10 ans seraient généralement peu dommageables à la plupart des espèces, car les organismes causant la pourriture ne peuvent se développer suffisamment pendant cette période (Nyland, 1994). Toutefois, Nyland (1994) rappelle que même si les blessures peu importantes risquent moins d'entraîner une pourriture de la tige, tout dommage infligé à un arbre peut créer un défaut causant le déclassement de la qualité de la bille. Ainsi, même une blessure relativement mineure aux racines ou au collet peut réduire le potentiel d'un arbre à produire une bille de pied de haute qualité.

### 3.2 Vigueur et résistance des arbres aux perturbations

Un arbre endommagé peut, avec le temps, former un cal (bourrelet cicatriciel) par-dessus sa blessure. Cela a pour effet de freiner la progression des champignons, d'isoler la zone du bois affecté par la pourriture et ultimement de l'enfouir sous du bois sain. L'efficacité de ce processus dépend toutefois de la grosseur de la blessure et de l'espèce de l'arbre blessé (Vasiliauskas, 2001). Il faut aussi que l'arbre soit vigoureux et que les conditions environnementales lui permettent d'avoir une bonne croissance (Anderson, 1994). Or, une ornière formée lors d'une coupe partielle peut affecter la vigueur et la croissance des arbres résiduels et perturber les conditions du sol. Les conséquences de l'orniérage ne se limitent donc pas aux blessures affectant les grosses racines et aux risques de coloration et de pourriture qu'elles impliquent. Une ornière de 10 cm de profondeur peut comprimer, tordre ou sectionner plusieurs racines de plus petites dimensions. Même une ornière de 5 cm peut causer des dommages à une proportion importante du système racinaire, comme le démontre le

tableau 1. La régénération des racines peut être relativement rapide après un dommage aux vieilles racines. Toutefois, si l'orniérage est accompagné de compactage, la recolonisation du sol par les racines peut être ralentie ou empêchée (Wästerlund, 1994a). Donc, l'impact de l'orniérage sur les arbres résiduels dépend vraisemblablement de l'interaction entre le compactage du sol et les dommages aux racines.

**Tableau 1 Répartition des racines selon la profondeur du sol et le type d'écosystème**

Profondeur du sol (cm)	Fraction cumulative des racines selon la profondeur (%) <sup>a</sup>		
	Forêt feuillue tempérée	Forêt coniférienne tempérée	Forêt boréale
5	16	11	25
10	29	22	44
15	40	31	59
20	50	38	69
25	58	46	77
30	65	52	83

a. Calculée à partir du modèle de Jackson et autres (1996).

À titre d'exemple, une étude réalisée dans des forêts feuillues du New Hampshire a identifié le compactage, par le passage de la machinerie, de plus de 40 % de la zone racinaire d'arbres résiduels comme une des causes probables de la mort de leur cime (*dieback*) (Lombard, 2001). La mortalité de la cime constituerait alors un signe observable de la perte de vigueur de ces arbres. En ce qui concerne la persistance des effets du compactage dans les coupes partielles, peu d'études existent à ce sujet. En Allemagne, le compactage du sol a été observé pendant 6 ans à la suite d'opérations de coupe partielle; dans une étude semblable réalisée en Suède, la durée a varié de 5 à 10 ans (Wästerlund, 1994a).

Des champignons causant des maladies comme le pourridié-agaric (*Armillaria*) et la coloration filiforme de l'aubier (*Ceratocystis coerulescens*) peuvent aussi utiliser les blessures aux racines pour infecter les arbres et leur être potentiellement fatals (Nyland, 1994). Les recherches de Houston (1994) dans les érablières du nord de l'État de New York ont d'ailleurs démontré qu'il y avait une association presque universelle entre l'incidence de la coloration filiforme de l'aubier chez l'érable à sucre et la présence de blessures aux racines ou au collet.

Wästerlund (1994b) a soulevé une hypothèse intéressante sur la flore microbienne qui colonise la rhizosphère des arbres. La plupart des organismes de cette flore sont bénéfiques pour l'arbre et protègent son système racinaire en empêchant l'installation de pathogènes. En retour, l'arbre leur fournit des exsudats racinaires qui les alimentent. Or, lorsqu'une ornière écrase ou endommage les racines d'un arbre, le flux d'exsudats à cette flore protectrice est interrompu. Une nouvelle situation de compétition est alors créée dans la rhizosphère et pourrait permettre aux pathogènes d'envahir le système racinaire. Une étude suédoise a d'ailleurs établi que la prévalence de la maladie du rond (causée par *Heterobasidion annosum* [Fr.] Bref.) était très élevée à proximité de sentiers de débardage après des coupes partielles dans des peuplements d'épinettes de Norvège, et qu'elle déclinait rapidement en s'éloignant des sentiers. Cependant, l'étude n'a pas formellement confirmé que l'orniérage dans les sentiers était la cause de ce patron d'infection (Bernhardsson et Martinsson, 1986 dans Wästerlund, 1994b). Dans le même ordre d'idées, certains chercheurs ont émis l'hypothèse que les blessures infligées aux racines pouvaient causer la libération dans le sol de composés organiques attirant certains insectes, notamment le dendroctone du pin (Blanche et autres, 1985).

Il est également possible que l'orniérage augmente la susceptibilité des arbres au chablis. Dans les peuplements ayant fait l'objet de coupes partielles, les risques de chablis des arbres résiduels près des sentiers de débardage sont plus élevés, car ces arbres sont peu adaptés aux nouvelles conditions de vent. Les bris causés au système racinaire par les ornières peuvent en outre réduire la stabilité des arbres en affectant leur ancrage au sol (Shea, 1967 dans McNeel et autres, 1996). Les risques de chablis pourraient être encore plus élevés si l'orniérage augmente la fréquence des cas de pourriture des racines ou du tronc.

### 3.3 Croissance des arbres

Les coupes partielles modifient généralement le degré de compétition entre les individus qui composent le peuplement, spécialement à proximité des sentiers de débardage. Toutefois, comme l'orniérage perturbe à la fois le sol et le système racinaire, les effets positifs d'un accroissement de l'espace, de la disponibilité de la lumière et des éléments nutritifs vont interagir avec les effets négatifs des dommages aux racines. Les arbres affectés ne bénéficieront donc pas nécessairement du regain de croissance attendu à la suite d'une coupe partielle. À titre d'exemple, dans des jeunes peuplements d'épinettes de Norvège ayant subi une coupe de dégagement, on a observé que pour 14 à 25 % des arbres résiduels ne présentant aucune blessure visible, la croissance annuelle en hauteur avait diminué de 25 % en moyenne pendant les deux années suivant la coupe (Wästerlund, 1988). Cependant, dans une autre étude, Jansson et Wästerlund (1999) n'ont trouvé aucune réduction de croissance des tiges. Ce résultat peut être attribué au fait qu'il y avait eu un seul passage de machinerie légère lors de la coupe et que le type de sol dérivait d'un till sableux.

Plusieurs auteurs, dont Vasiliauskas (2001) et Miller et autres (1996), mettent en garde contre une généralisation des effets de l'orniérage sur la croissance. En effet, plusieurs études, notamment celle de Reisinger et autres (1994); réalisée en Arkansas dans des peuplements de *Pinus taeda*, ne mentionnent aucun effet négatif et rapportent même l'impact positif d'un léger orniérage sur la croissance des peuplements résiduels. Il est possible que des arbres poussant sur des sols très fertiles puissent tolérer des perturbations graves du sol et des blessures importantes à leurs racines sans que leur croissance soit réduite de façon marquée (Miller et autres, 1996; Jansson et Wästerlund, 1999). On rapporte généralement que les perturbations majeures du sol attribuables à l'orniérage surviennent après les premiers passages de la machinerie (Froelich et McNabb, 1983). Dans le cas des coupes partielles, toutefois, il se pourrait que des passages répétés dans la même ornière affaiblissent progressivement le système racinaire et la vigueur générale de l'arbre (Jansson et Wästerlund, 1999).

L'ampleur de l'impact de l'orniérage sur la croissance du peuplement résiduel dépend donc de nombreux facteurs, particulièrement de la proportion du système racinaire affecté. Ouimet et autres (2005) ont observé que les risques de perturbation de la croissance des arbres situés à proximité de tranchées servant à l'enfouissement des tuyaux de récolte de la sève dans les érablières, étaient corrélés au ratio de la distance de la tranchée par rapport au diamètre à hauteur de poitrine de l'arbre. Ainsi, un arbre présentant un ratio inférieur à 6 cm/cm présente un ralentissement de croissance dans 99 % des cas, alors qu'avec un ratio de 12 cm/cm, le risque de ralentissement de la croissance n'est que de 15 %. Dans la mesure où l'effet d'une ornière peut être comparé à l'effet d'une tranchée, cette étude démontre la relation entre les dimensions des arbres et les risques potentiels de l'orniérage sur leur croissance.

Aussi, une équipe de recherche du ministère des Ressources naturelles de l'Ontario a développé un modèle permettant d'estimer la fraction des racines d'un arbre résiduel qui serait endommagée par une ornière (voir Annexe A). Ce modèle, appelé *Root-Rut Assessment Calculator* (RRASCAL), est adapté aux espèces commerciales des forêts feuillues de la région des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Il est basé sur des paramètres de l'architecture des racines issus de la littérature qui varient selon l'espèce d'arbre et ses dimensions ainsi que sur les caractéristiques du sol (profondeur, texture, etc.). Des projets de recherche sont en cours pour établir un lien entre la proportion de la surface du système racinaire perturbée par des ornières, comme celle estimée par le modèle RRASCAL, la croissance en diamètre et la productivité forestière (Anderson, 2007, comm. personnelle).

Wästerlund (1983 dans Wästerlund, 1994a) a développé, pour le pin sylvestre et l'épinette de Norvège, un modèle semblable à RRASCAL auquel il a maillé des données de croissance. Ce modèle permet ainsi de prédire la réduction de croissance théorique d'un arbre en fonction de son espèce, de son âge et de la distance par rapport à une ornière donnée (figure 1). Sur cette figure, on peut constater que la croissance de l'épinette de Norvège est plus affectée que celle du pin sylvestre par la présence de l'ornière à proximité de son tronc. Ces données mettent en lumière le fait qu'il y a une grande variation de susceptibilité aux impacts de l'orniérage entre les espèces. Il serait donc **impossible de développer un modèle unique** permettant d'exprimer la relation entre une ornière et ses effets sur les arbres résiduels.

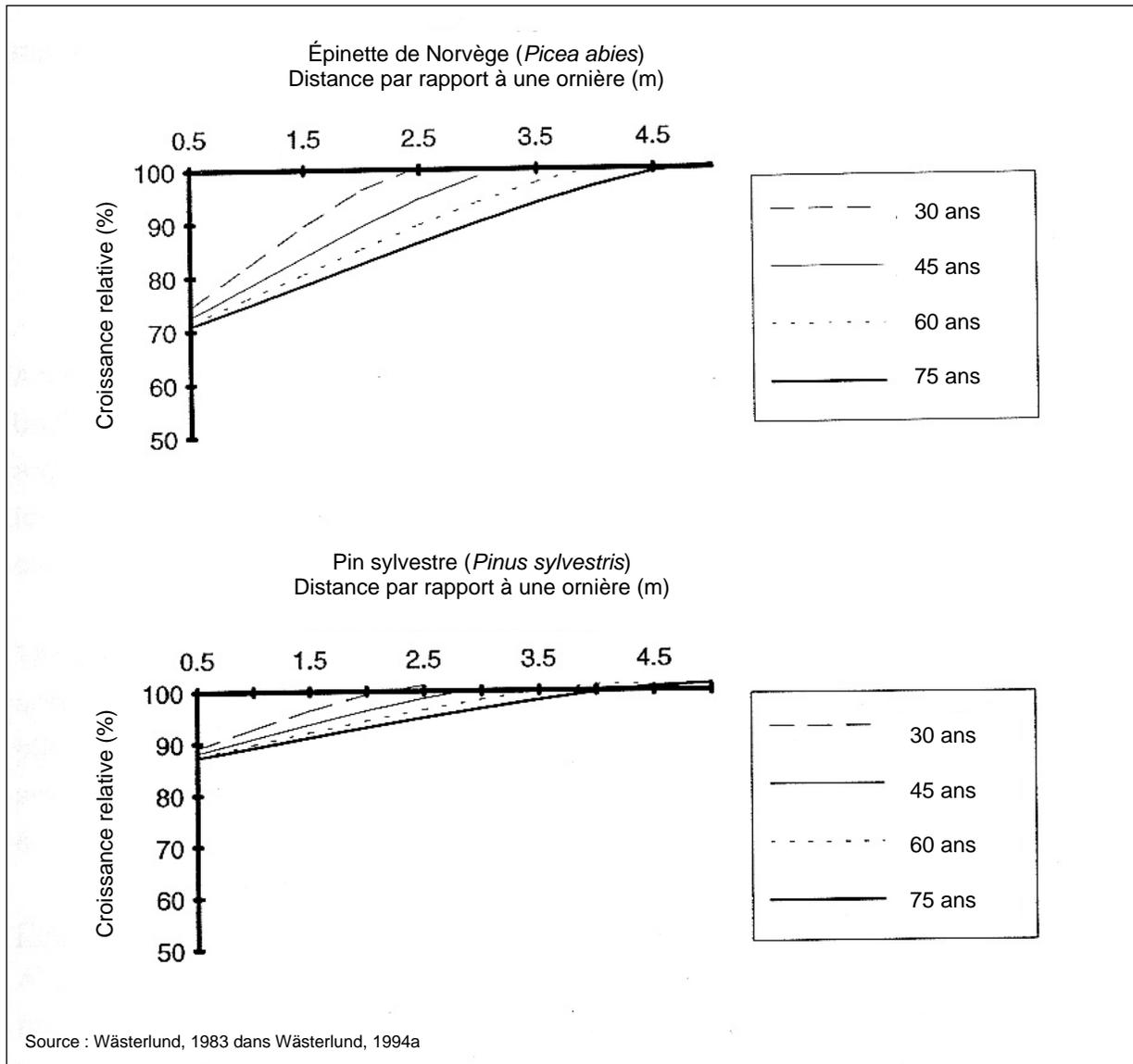


Figure 1 Croissance relative prévue à la suite des dommages causés au sol et aux racines

## 4. Les normes et la réglementation concernant l'orniérage et les blessures aux racines

Au Canada, la plupart des provinces se sont données, dans leur législation, des définitions de l'orniérage ainsi que des normes et des limites concernant le niveau de perturbation acceptable dans un parterre de coupe; plusieurs États américains ont également de tels seuils (Van Rees, 2002). Toutefois, aucune province ou État ne semble avoir de mesures particulières pour les coupes partielles. En effet, les normes en matière d'orniérage sont appliquées dans tous les parterres de coupe, peu importe le système sylvicole utilisé.

### 4.1 Ontario

Comme l'a constaté Van Rees (2002), l'Ontario ne possède aucune définition ou norme provinciale en ce qui concerne l'orniérage. Toutefois, les plans individuels d'aménagement forestier, qui sont associés à des concessions forestières, peuvent inclure des seuils d'orniérage à respecter lors des coupes; le contrôle des perturbations du sol peut donc se faire à une échelle locale (Duckert, 2007, comm. personnelle). L'Ontario s'est engagée dans un processus de révision des règlements régissant l'aménagement forestier en forêt publique. De nouvelles normes ont été soumises à une consultation publique au cours de l'année 2007 et des normes concernant l'orniérage devraient faire partie de la nouvelle politique d'aménagement forestier (Duckert, 2007, comm. personnelle).

Pour aider à déterminer des normes sur l'orniérage, plusieurs études ont été effectuées ou sont en cours de réalisation en Ontario. Dans la région des Grands Lacs et du Saint-Laurent, des chercheurs de l'Institut canadien de recherche en foresterie (Forest Engineering Research Institute of Canada [FERIC]) ont mené un projet, en 2003 et 2004, dans des peuplements de feuillus tolérants soumis à des coupes de jardinage (Partington et Lirette, 2005). Cette étude visait à évaluer une proposition de ligne directrice sur l'orniérage qui recommande de limiter à 8 % la proportion d'une aire de coupe perturbée par des ornières importantes, c'est-à-dire dont la profondeur est supérieure à 20 cm. Les résultats de cette étude ont révélé un taux d'orniérage ne dépassant pas 2 % du parterre de coupe, et ce, même dans les coupes d'automne (Partington et Lirette, 2005). Le seuil de 8 % semble donc facile à respecter dans les coupes partielles et pourrait même être diminué. Selon les chercheurs de FERIC, puisque les ornières profondes sont concentrées dans les sentiers très achalandés, il semble judicieux de limiter la proportion du territoire occupée par de tels sentiers; bien que ceux-ci risquent d'être fortement perturbés, la quantité totale d'orniérage à l'échelle du parterre de coupe sera quand même limitée.

La définition que l'Ontario envisage adopter pour une ornière précise que celle-ci doit mesurer au moins 4 m de longueur. L'étude de FERIC a démontré que ce critère permet de dénombrer la majorité des ornières importantes, au moment des inventaires. Toutefois, les auteurs indiquent qu'une longueur de 2 m assurerait un inventaire plus exhaustif des ornières, pour une multitude de conditions de site (Partington et Lirette, 2006).

Dans le même ordre d'idées, un projet de recherche a été entrepris en 2005 par le ministère des Ressources naturelles de l'Ontario sous la supervision de Dave Deugo (spécialiste forestier, Ontario Ministry of Natural Resources) (annexe A). Ce projet vise à quantifier les impacts des sentiers de débardage sur la croissance des peuplements de feuillus tolérants jardinés. Ce projet a été initié à la suite d'observations faites dans des peuplements ayant subi une première éclaircie il y a 20 ans et où la croissance réelle de la surface terrière pendant

cette période a été inférieure à ce qui était anticipé. On a soupçonné que la première coupe avait occasionné des dommages au sol et aux arbres résiduels avec comme effet de diminuer leur croissance : d'où la mise en place d'un dispositif de recherche pour tester des hypothèses.

Dans le cadre de ce projet, une version simplifiée du modèle RRASCAL est utilisée pour estimer la proportion du système racinaire des arbres résiduels potentiellement touchée par le bris des racines et le compactage du sol dans les sentiers de débardage. Avec ce modèle, les arbres résiduels sont classés dans la catégorie « affectés » (en précisant le degré de dommage potentiel) ou « non affectés ». Des carottes sont ensuite prélevées dans ces arbres pour mesurer leur croissance en diamètre. Ces mesures seront corrélées avec un ensemble de facteurs, tels que le diamètre de l'arbre, la classe de qualité de tige, la qualité de sa cime, le degré de dégagement après la coupe, la distance qui le sépare du sentier de débardage et le degré de dommage potentiel aux racines. Des résultats préliminaires montrent que les arbres dont le système racinaire avait été affecté par des ornières ont vu leur croissance en diamètre diminuer après la coupe, par rapport aux arbres non affectés (Anderson, 2007, comm. personnelle). Une analyse plus détaillée des résultats devra toutefois être réalisée avant de pouvoir tirer des conclusions.

## 4.2 Suède

La Suède est un pays où on aménage la forêt depuis fort longtemps. Seulement 5 % du territoire est sous juridiction de l'État, le reste étant sous propriété privée. En 1993, la Suède s'est dotée d'une nouvelle loi sur les forêts, dans laquelle la production durable de produits forestiers et la conservation de la nature ont une importance égale. Selon cette loi, l'atteinte de ces deux objectifs doit être prouvée par les propriétaires et les opérateurs forestiers. L'ancienne loi (datant de 1979) comportait des normes fermes à respecter lors des opérations forestières et des travaux sylvicoles. Ces normes n'existent plus dans la nouvelle version; un comité national (Agence forestière suédoise *Skogstyrelsen*) a pour mandat d'émettre des recommandations sur la manière d'interpréter la loi. Il n'y a pas de pénalité en cas de non-respect de ces recommandations, mais l'opérateur forestier doit faire la preuve qu'il peut assurer la viabilité de la forêt sur le site et s'y engager.

En matière de protection des sols et des peuplements résiduels, les recommandations de l'Agence *Skogstyrelsen* mentionnent que les ornières de plus de 10 cm de profondeur devraient être évitées et que les dommages aux arbres résiduels ne devraient pas dépasser 5 %. La notion de dommage n'est pas précisément définie. De nombreuses discussions ont eu lieu sur la définition de dommage aux racines. Basé sur les travaux de Nilsson et Hyppel (1968 dans McNeel et autres, 1996), il a d'abord été convenu que seules comptaient les blessures aux racines (causées par une ornière ou autrement) qui surviennent à moins de 70 cm des arbres résiduels. Toutefois, il est devenu évident qu'un tel standard ne pouvait être respecté qu'en utilisant des sentiers de débardage très larges (jusqu'à 5 mètres) et que, ce faisant, la productivité forestière par unité de surface était réduite et que les arbres en bordure des chemins croissaient de manière asymétrique. En pratique, des sentiers d'environ 4 m sont utilisés, mais les branches des arbres récoltés sont déposées au sol pour servir de tapis sous les roues de la machinerie (Wästerlund, 2007 comm. personnelle).

En Suède, la tendance lors d'opérations dans les coupes partielles est à l'utilisation d'une machinerie relativement grosse : les petits engins (de 5 à 10 tonnes) sont considérés comme peu rentables. Les objectifs de protection du sol et des racines sont toutefois plus difficiles à atteindre lorsque de gros engins sont utilisés, et ce, même en recouvrant les sentiers d'un tapis

de résidus. De plus, il semble que dans la pratique, on observe de plus en plus de dommages au sol et aux racines des arbres résiduels lors de coupes partielles parce que les périodes où le sol est fragile et susceptible à l'orniérage (plus de pluie et moins de gel) sont plus fréquentes en raison des changements climatiques (Wästerlund, 2007 comm. personnelle).

### 4.3 Québec

Les normes en matière d'orniérage au Québec ne sont pas appliquées dans les coupes partielles, car la méthode de mesure et de suivi des ornières ne s'y prête pas. L'enjeu principal en coupe partielle concerne les conséquences potentielles de l'orniérage pour le peuplement résiduel. Or, le Québec est doté de normes relativement précises sur la protection des arbres résiduels lors des opérations de coupe partielle. Ainsi, le document *Instructions relatives à l'application du règlement sur la valeur des traitements sylvicoles admissibles en paiement des droits* (MRNF, 2006a) mentionne qu'après une coupe partielle, « le pourcentage de surface terrière des tiges blessées de toutes les essences et de toutes les priorités de récolte de 10 cm et plus ne doit pas excéder 10 % de l'ensemble des tiges résiduelles ». Ce document définit une tige blessée comme étant un arbre ayant subi une ou plusieurs blessures importantes lors des opérations de récolte. Les critères d'évaluation des blessures infligées aux arbres sont présentés dans l'annexe 1 du document *Méthodes d'échantillonnage pour les inventaires d'intervention (inventaire avant traitement) et pour les suivis des interventions forestières (après martelage, après coupe et années antérieures)* (MRNF, 2006b). Les blessures aux racines, c'est-à-dire la cassure et l'éraflure de racines principales ainsi que le bris de racines secondaires, sont prises en compte dans ces critères et sont énumérées dans le tableau 2 du présent document.

Il serait donc possible d'utiliser les normes déjà existantes pour dénombrer les blessures infligées aux racines par l'orniérage lors d'une coupe partielle. Lorsque l'une des blessures mentionnées dans le tableau 2 est observée, elle cause un déclassement de la vigueur de la tige, parce qu'on considère que la blessure compromet la survie de l'arbre ou la qualité de son bois. Il est important de rappeler que le nombre de tiges blessées (aux racines ou autrement) fait partie des critères d'admissibilité du traitement au paiement des crédits sylvicoles.

**Tableau 2 Critères d'évaluation des blessures infligées aux racines lors d'une coupe partielle**

Blessure d'exploitation	Critères d'évaluation des blessures <sup>b</sup>		
	Vigueur avant la coupe	Vigueur après la coupe	Vigueur après une coupe d'avril à juillet (inclus)
1 racine principale cassée ou écorchée, sinon racines secondaires touchées sur moins de 2 faces			
Tous les feuillus	S	S	M
	C	C	S
	R		
Plus de 2 racines principales cassées ou écorchées, sinon racines secondaires touchées sur plus de 2 faces			
Bouleau blanc, érable rouge, hêtre à grandes feuilles et peuplier	S		
	C	M	M
	R		
Autres feuillus	S		
	C	S	M
	R		
1 racine principale ou plus écorchée ou racines secondaires brisées sur plus d'une face			
Sapin baumier	S		
	C	M	M
	R		
Autres résineux	S	S	S
	C	C	C
	R		
2 racines principales ou plus écorchées ou racines secondaires brisées sur plus de 2 faces			
Tous les résineux	S		
	C	M	M
	R		

a. Source : MRNF, 2006b.

b. M : tige très défectueuse qui risque de se renverser, de se rompre ou de mourir sur pied avant la prochaine récolte.

S : tige défectueuse dont le volume marchand risque de diminuer (carie), mais dont la survie n'est pas compromise avant la prochaine récolte.

C : tige peu défectueuse (coloration de cœur ou carie latente) dont le volume marchand ne risque pas de se dégrader et qui peut être conservée jusqu'à la prochaine récolte.

R : tige saine, idéalement marquée pour rester, qui constitue le capital forestier de premier choix.



## Annexe A Description des recherches sur les perturbations du sol en Ontario (en anglais)

### **Site Disturbance Issues In Ontario**

Forest tree species of the Great Lakes-St. Lawrence Region in Ontario are often managed under partial-cutting systems such as Single-Tree Selection and Uniform Shelterwood. The residual stand is intended to grow and increase in value between cutting cycles, commonly of 15-to-20 years duration under Selection Systems.

Logging damage that occurs on these residual trees will compromise this objective. A Rutting Impact Study, specific to partial cutting systems, has been initiated and managed by Dave Deugo of OMNR at Bracebridge, as part of an Ontario Provincial Site Disturbance Impacts Study. One of the objectives is to develop an "Effects Grid" in order to recommend guidelines or best silvicultural practices that will mitigate many of the negative impacts of rutting on sustainable forest productivity.

### **Literature Search**

A continuing search of the scientific literature has resulted, to date, in a collection of 805 publications, of which 780 have been compiled so far into a ProCite database. Keyword searches of this database are being used to identify and review significant articles dealing with various topics such as : root architecture, physical soil impacts (e.g., compaction), decay development, long-term effects of damage on growth rate and product value, machine design, skid-trail preplanning, audit procedures (compliance), mitigation methods, ground rules, recommendations and guidelines, etc.

### **RRASCAL**

A BASIC computer program named RRASCAL (Root-Rut ASsessment CALculator) has been written to estimate the proportions of the horizontal root systems of residual (crop) trees that may have been damaged by root-shearing and soil compaction associated with soil rutting. Point-sampling theory is used to identify trees whose roots are impinged by the rut, and to assess their individual degree of root damage. The estimate is based on parameters of root architecture (derived from the literature search) and varies with tree species and size, and soil characteristics (depth, texture, etc). Damage is summarized on a sample plot basis by species, basal area affected, and tree quality. The technique can be used by a one-person crew if necessary. The program is currently being updated to adjust for boundary overlap associated with ruts that terminate within the sample area.

The program is written for a data-logger and data can be analyzed in the field. The results can be compared to any current standards of compliance and can provide opportunities to have careless logging practices addressed and mitigated on-the-spot. Data can be uploaded into a computer database in order to track historical performance and to summarize seasonal trends of logging damage related to such factors as weather conditions, etc.

In order for RRASCAL to be as realistic as possible, program parameters must be based on the best science available. An intensive literature review is continuing to allow calibration of the model according to available research information. In the absence of acceptable precise assessment procedures, this technique offers reasonable approximations.

## **Field Studies**

A three-year study named “Quantification of Skid Trail Impacts on Tolerant Hardwood Tree Diameter Growth” was initiated in 2005 by Murray Woods, OMNR, North Bay and is currently supervised by Dave Deugo. In this study, to date, 425 trees have been examined in 27 skid-trail segments over two townships. A simplified version of the RRASCAL program was used to classify sample trees as either “root-disturbed (specifying the degree of damage)” or “root-undisturbed”.

A preliminary analysis of the data indicates that root-disturbed trees have a reduced diameter growth rate subsequent to the harvest date. A more comprehensive analysis of the contributing variables is underway.

On each rut segment, soil compaction (a measure of bulk density) was measured at locations both on the skid trail and also on the adjacent undisturbed forest soil using an RIMK CP40 Penetrometer. This data has not yet been analysed with respect to growth impacts on the sample trees.

H.W. Anderson  
Scientist Emeritus, OFRI  
February 22, 2007.

Annexe B Document sur les normes et règlements canadiens sur les perturbations du sol (en anglais)

**REGULATIONS AND GUIDELINES FOR  
SOIL DISTURBANCE ACROSS CANADA**

**For Weyerhaeuser Saskatchewan**

**Ken Van Rees  
Department of Soil Science  
University of Saskatchewan**

**June 2002**

## **EXECUTIVE SUMMARY**

Maintaining site productivity requires the conservation of soil resources, particularly by reducing or preventing soil disturbance. There are various soil disturbance types ranging from rutting, compaction to roadways and landings. These soil disturbance regimes, however, are defined differently in each of the provinces and the regulations concerning these disturbance types also vary among the provinces. This report summarizes how each of the provinces has defined different soil disturbance regimes and what guidelines and/or standards have been developed for these disturbance types.

British Columbia has the most comprehensive definitions and guidelines in the country where specific criteria are given for various disturbance types as well as the amount of disturbance that can occur on the land base. Rutting is the one soil disturbance that all provinces that have developed guidelines (B.C., Alberta, Quebec, Newfoundland) have identified as an important soil disturbance to be measured. Definitions for rutting, however, vary across the country ranging in depth from 5 to 30 cm deep and anywhere from 2 to 10 m in length (rutting in the U.S. varies from 5 to 46 cm deep and 3 to 15 m in length). The amount of rutting that can occur in a cutblock ranges from 1% (SK) to 10% (B.C.). These varied definitions make it very difficult to compare disturbance types across the country. Saskatchewan also has two definitions for rutting, one from the Saskatchewan Forest Impacts Monitoring Scientific Advisory Board and the other from the condition for Weyerhaeuser from the provincial government. These two definitions will need to be harmonized in order to maintain consistency and comparison in future monitoring of forest impacts on soils in Saskatchewan. Ontario has not defined their soil disturbance types but the province has identified best forest management practices to reduce various soil disturbance regimes.

**BACKGROUND:**

Objectives:

1) To describe soil disturbance limits from forest operations and methods for Weyerhaeuser to achieve those limits.

2) To review and establish soil classes and moisture conditions suitable for operating during periods when the ground is unfrozen.

Description:

*Section 3.8.4 (e)*

*This report will include an evaluation of the current practice of stumped landings as well as limits for soil disturbance: i) for exposure of mineral soils, and ii) for soil horizon changes including displacement, mixing (site preparation), rutting and compaction. Report to evaluate methods and reports on conformance with soil limits, assess available practices, methods and equipment to meet 20 year plan objectives and (new) limits, and an evaluation of direct planting. The report will include a review and evaluation of forest practices and standards in other boreal forest jurisdictions. Operating standards (limits) and associated guidelines shall be developed and incorporated into the report.*

Scope:

The purpose of the report is to establish Company standards (limits) for soil disturbance as a result of harvesting and silviculture operations.

Section 3.8.4 (g)

The report will include a review and evaluation of forest practices in other boreal forest jurisdictions. Operating standards (limits) and associated guidelines shall be developed for operating in various soils and moisture conditions when the ground is unfrozen.

This report shall include a definition of frozen soils (e.g. frost depths), for both organic and mineral soils. This definition shall be based on the load bearing capacity of the soils, and associated with their capability to support heavy machinery.

Scope:

The purpose of the report is to provide field personnel direction and options on how to operate in various soil and moisture conditions.

Section 3.8.4 (b)

The report should address PA 20 FMA condition 3.8.4 (b) and EA Approval section 8(2) that require reclamation/restoration of all roads and landings to approach a standard of no net loss of productive forest habitat and site productivity.

## INTRODUCTION

Development of disturbance limits requires an understanding of what disturbances should be measured and how they are defined as well as knowing what other jurisdictions are doing for standards and guidelines. Grigal (2000) in a review of forest management activities on site productivity investigated what activities had the greatest impact on soil properties (Table 1). He found that the most important factors affecting long-term site productivity were related to the physical rather than the chemical or biological properties of the soil. The two most important factors affecting long-term productivity were roadways and site disturbance while soil erosion, mass flow and compaction/rutting had a medium impact on productivity. The extent and severity of these effects will vary for different forest regions due to harvesting practices, equipment, season of harvest, climate and soil type. Therefore, it is important that guidelines and standards for soil impacts reflect these factors.

In order to describe soil limits it is also important to examine how other jurisdictions have defined soil disturbance criteria and what standards and guidelines have been implemented. However, definitions and standards will not be uniform across all forest regions due to the factors discussed above. In addition, the standards can also be affected by how one measures the soil disturbance criteria in the field. Different sampling methodologies can produce different estimates of % soil disturbance which may or may not meet the standards and guidelines. Thus a uniform sampling methodology needs to be implemented by both industry and government in order to obtain comparable estimates of soil disturbance. In addition, if the definitions of soil disturbance are different between organizations or provinces, then the standards using those definitions may not be comparable across regions. Despite these limitations, the criteria for the various types of soil disturbance regimes in each province is given in Table 2, and the standards and guidelines related to the soil disturbance types are presented in Table 3. Some provinces, however, have no regulations or definitions related to soil disturbance or simply no information could be found resulting in the tables having blank boxes for various categories.

Table 1. Assessment of extensive forest management activities on soil properties (Grigal, 2000)

Effect	Severity	Spatial Extent	Certainty	Duration	Deviation from Natural	Implications	Importance
Surface erosion	Low	Large	Medium	Medium	No	Water quality	Medium
Mass flow	High	Small	Low	Long	Yes	Water quality	Medium
Roads	High	Medium	High	Long	Yes	Access for management	High
Compaction/rutting	Medium	Medium	High	Medium to long	Yes		Medium
Site disturbance	Medium	Large	High	Medium	Yes	Collective measure	High
Nutrient loss by leaching	Low	Large	Medium	Short	No		Low
Nutrient loss in product	Medium	Large	High	Medium to long	Yes		Low
Biological disruption	Medium	Large	Medium	Medium	No		Low

## **REVIEW OF PRACTICES AND STANDARDS FOR OTHER JURISDICTIONS**

### **British Columbia**

British Columbia has the most comprehensive definitions and guidelines for soil disturbance regimes in Canada based on the Forest Practice Codes (B.C. Ministry of Forests, 2001a,b). British Columbia is the only province to give definitions not only for rutting but also for compaction, gouges and scalps (Table 2) (B.C. Ministry of Forests, 2001a). The rutting length of 2 m is the shortest for all the provinces. Permanent access structures (roads or other structures that provide access to the forest) should not occupy more than 7% of the total area of prescription. Temporary access structures (roads, landings, quarries, bladed trails main skid trails, corduroyed trails etc) are grouped with other soil disturbance types (compaction, rutting etc) and fall under the soil disturbance guidelines according to region and soil sensitivity rating (Table 3).

### **Alberta**

Roads and road areas (stripped landings and displaced soil) in Alberta are not to exceed 5% of the total cutblock area (Alberta Land and Forest Service, 2001). Soil disturbance such as displacement, compaction or rutting from harvesting operations can not exceed 2% of the cutblock area as measured by a linear transect method. Ruts are defined as being 4 m long and the depth of the rut depends on whether you are in organic or mineral soils (Table 2).

### **Saskatchewan**

Provincial guidelines and/or regulations are currently being developed by the Forest Ecosystems Branch for the province. For Weyerhaeuser's Forest management area in upland cutblocks, ruts have been defined as being 10 m and 15 cm deep in mineral soil while in riparian management areas ruts are defined as being 5 m long and 12 cm deep. The definition of a rut in the upland cutblocks, however, contradicts the definition being used by the Saskatchewan Forest Impacts Monitoring Scientific Advisory Board where a rut is defined as being 5 m long (Enns, 2002). Thus, a uniform definition for rutting needs to be agreed upon before any measurements are taken to ensure consistency in monitoring soil disturbance in the province. A limit of 1% rutting has been assigned to the Weyerhaeuser FMA as part of their conditions for the 20 year plan.

### **Manitoba**

No formal guidelines have been developed. The Manitoba Model Forest in conjunction with Tembec Industries has been monitoring rutting on harvested blocks but no details are given as to the criteria for rutting (<http://www.ManitobaModelForest.net/>).

### **Ontario**

Forest management guidelines have been developed (Archibald et al., 1997) for Ontario; however, there are no specific definitions (i.e. depth or length or rutting etc) or guidelines as to how much a certain disturbance can occur in a cutblock. In the guidelines there is information

related to compaction and rutting and soil erosion with descriptions of the disturbances, how the disturbance impacts the site, best management practices to reduce the disturbance as well as a broadly defined hazard rating system for the different types of disturbance based on several factors.

### **Quebec**

Soil disturbance definitions are only given for rutting where ruts are 4 m in length and > 15 cm deep (Table 2) (Jetté et al., 2001). Standards for rutting are somewhat different than the other provinces where the amount of rutting is dependent on the length of trails and the amount of skidtrails is determined on an area basis (Table 3). The amount of skid trails is to be < 33% of the cutblock. The loss of productive area is being monitored by sampling 40 m from the edge of the roads and landings; erosion events are measured by observation from roadways (Jean-Pierre Jetté, personal communication).

### **New Brunswick**

No information available

### **Nova Scotia**

No information available

### **Newfoundland**

Based on the report by the Department of Forest Resources and Agrifoods, Forest Engineering and Industry Services (Anonymous, 2000) operating areas are randomly selected (stratified by logging system and season) for logging surveys (utilization), cutover disturbance, regeneration, terrain classification and slope surveys. Statistical significance is based on being within 20% of the mean at a 90% confidence interval. Disturbance surveys consist of undegraded, compacted, bulldozed and slash cover. No definitions are given as to what compacted soil means and how it is measured. The Newfoundland Environmental Protection Guidelines state that no more than 10% of the total productive forest in a cutblock can be disturbed. If this limit is exceeded, a rehabilitation plan would need to be implemented to reduce the disturbance below 10%. Newfoundland also uses a terrain classification system for determining trafficability based on ground strength, ground roughness and slope or grade.

### **Other Jurisdictions:**

In Sweden, when doing thinning trials, ruts can not be greater than 10 cm deep (Myhrman, 1990). In the United States, a Forest Health Monitoring program has been established by the Forest Service to define soil disturbance criteria and thresholds (Page-Dumroese et al., 2000; Powers et al., 1998). A threshold of 15 -20% (depending on region) has been given for the total amount of detrimental disturbance on a cutblock, excluding the road systems (Table 4). Within each forest region, definitions and thresholds are also given for various types of soil disturbance regimes (Table 4). Rutting depths vary from > 15 to 46 cm and lengths of 3 to >15 m. Compaction is also defined based on a measure of bulk density, porosity or soil strength.

Table 2. Comparison of soil disturbance definition criteria for the Canadian Provinces

Province	Compaction	Rutting	Gouges	Scalps
B.C.	Occupies 100% of 100 m <sup>2</sup> area and > 5 m wide Assessment: coarse platy structure loss of normal structure compared to undisturbed soil change in density from undisturbed using shovel or crushing soil with fingers	> 30 cm wide and 2 m long High to very high hazard sites: ruts 5 or 15 cm deep from mineral soil surface Low to mod. hazard sites: ruts 15 cm deep from forest floor surface	Deep Gouge: excavations > 30 cm deep or to bedrock from mineral soil surface Wide Gouge: excavations > 5 cm deep or to bedrock from mineral soil surface on > 80% of 1.8 X 1.8 m area Long Gouge: excavations > 5 cm deep or to bedrock from mineral soil surface on 100% of 1 X 3 m area	Wide Scalp: forest floor removal on > 80% of 1.8 X 1.8 m area Very Wide Scalp: forest floor removal on > 80% of 3 X 3 m area Continuous Scalp: continuous forest floor removal for > 5 m length (no width criteria)
Alberta		> 20 cm deep for organic layer > 30 cm deep >10 cm deep into mineral soil when organic layer < 30 cm > 4 m continuous length even if stumps, logs or rocks lift vehicle (4 m equivalent to one tire rotation)		
Sask.		RMA – 12 cm deep and 5 m long ; cutblocks – 15 cm deep in mineral soil and 10 m long		
Manitoba				

Ontario	Increase in soil bulk density from heavy equipment, occurs over broad areas; no specific criteria given	Creation of trench or furrows by breaking thru forest floor; no specific criteria given as to depth and length		
Quebec		> 20 cm deep and 4 m long		
N.B.				
N.S.				
NFD	Increase in soil density from machine traffic, includes wheel/track impressions and rutting – but no exact definition given	Is mentioned but no specifics given to definition		

Table 3. Comparison of standards and limits between provinces

Province	Access structures	Compaction	Rutting	Gouges	Scalping	Reference
B.C.	Permanent access 7% of NAR, unless special conditions; roadside work areas – level of soil disturbance ≤ 25% of area in NAR; temporary access structures follow soil disturbance standards	VH Sensitivity – 5% for Coast & Interior; L, M, H sensitivity – 5% Coast & 10% Interior				BC Ministry of Forests, 2001b
Alberta	≤ 5% of block area (includes stripped landings and displaced soil areas)	< 2% of block area				Alberta Lands & Forest Service, 2001
Sask.			< 1% (condition on Weyer. 20 yr plan)			
Manitoba						
Ontario	None given	None given	None given	None given	None given	Archibald et al., 1997
Quebec	<33% of block can be in skid trails		< 20 % of trail length can be rutted in cutblock			Jetté et al., 2001
N.B.						
N.S.						
NFD	≤10% of total forest in operating area can be excessively disturbed					Environ. Protection Guidelines, Schedule IV, no date

Table 4. Threshold guidelines for various soil disturbance types in different Forest Service Regions of the United States.

Disturbance Type	Forest Service Region†	Threshold Value
Operational Area	1,2,4,6,8,10 9	Total of all detrimental disturbances should not exceed 15% of the operating block, excluding system roads. Total of all detrimental disturbances should not exceed 20% of the operating block, excluding system roads.
Displacement	1 2 4 5 6 8 9 10	Loss of either 2.5 cm of surface soil or one-half of humus-enriched A horizon, whichever is less. Soil loss from a contiguous area > 9 m <sup>2</sup> . Removal of > 50% of humus-enriched surface soil or 5 cm of soil from an area 1 m <sup>2</sup> . Organic matter in upper 30 cm is < 85% of SOM found under natural conditions. Removal of > 50% of surface soil or humus-enriched A1 and/or AC horizons from an area 9.3 m <sup>2</sup> and 1.5 m wide. Removal of > 50% of humus-enriched A horizon from a continuous area 5.6 m <sup>2</sup> and 1 m wide. Removal to a depth of one-half the thickness of the A horizon over an area 5.6 m <sup>2</sup> and 1 m wide. Removal of forest floor and 50% of surface soil from an area 9.3 m <sup>2</sup> and 1.5 m wide.
Compaction	1 2 3 4 5 6 8 9,10	Bulk density increase of 15% (20% on volcanic soils). BD increased > 15% over natural conditions or exceeding 1.25 to 1.60 g cm <sup>-3</sup> , depending on soil texture. BD increased by 15%. Soil strength increased by > 50%. Reduction of > 10% in total soil porosity or a doubling of soil strength in any 5 cm increment of the surface soil. Reduction of > 10% in total soil porosity. Threshold determined for each soil type. BD increase by 15%, reduction of 50% of macropores from undisturbed and/or 15% reduction in macropores measured by air permeameter for soils other than volcanic soils; BD increase of 20% for volcanic soils. BD increase of 15% and >20% decrease in macroporosity over natural conditions. BD increase of 15% over natural conditions.
Rutting and Puddling	1 4, 10 6 8 9	Soil puddling present; ruts 5 cm deep. Ruts in mineral or organic soil. Ruts 15 cm deep. Ruts 15 cm deep for a continuous distance of > 15 m, ruts > 30 cm deep for > 3 m, and ruts > 46 cm deep for any distance. Ruts > 46 cm deep anywhere in block, or ruts > 30 cm deep for > 3 m.

† Forest Service regions: 1 - Northern; 2 - Rocky Mountains; 3 - Southwestern; 4 - Intermountain; 5 - Pacific Southwest; 6 - Pacific Northwest; 8 - Southern; 9 - Eastern; 10 - Alaska  
(Source: Page-Dumroese et al. 2000; Powers et al. 1998)

There are many documents and practical field guides related to minimizing soil disturbance during harvesting operations and they are listed below:

[Archibald](#), D.J., W.B. Whiltshire, D.M. Morris, and B.D. Batchelor. 1997. Forest management guidelines for the protection of the physical environment. Ontario Ministry of Natural Resources, Queens Press, Toronto.

[Arnup](#), R.W. 1998. The extent, effects and management of forestry-related soil disturbance, with reference to implications for the clay belt: a literature review. Ont. Ministry Natural Resources, Northeast Science and Technology. TR-037.

Arnup, R. 2000. Minimizing soil disturbance in forestry operations: A practical field guide. Lake Abitibi Model Forest, Cochrane, ON.

[Ehnes](#), J. and D. Sidders. A guide to harvesting practices to regenerate a natural forest. Manitoba Model Forest, Pine Falls, MB.

MacDonald, A.J. 1999. Harvesting systems and equipment in British Columbia. B.C. Ministry of Forests, Forest Engineering Research Institute of Canada, Handbook No. HB-12.

[McMorland, B. and S. Corrandini](#). 1999. Impact of machine traffic on soil and regeneration. Proceedings of Feric's Machine Traffic / Soil Interaction workshop. FERIC Special Report No. SR-133.

[Peacock](#), H. 1996. Guidelines for environmentally responsible forestry operations in Manitoba: A practical guide towards sustainable forestry operations. Manitoba Model Forest, Pine Falls, MB.

[Forest Science Program](#). 2002. Forest soil conservation and rehabilitation in B.C.: Opportunities, challenges and techniques. B.C. Ministry of Forests.

## REFERENCES

- Alberta Land and Forest Service. No date. Forest soils conservation. Alberta Forest Products Association/Land & Forest Service, Task Force Report.
- Alberta Land and Forest Service. 2001. Forest operations compliance audit protocol. Alberta Sustainable Resource Development.
- Anonymous. 2000. Guidelines for evaluation of logging systems. Forest Engineering and Industry Services, Department of Forest Resources and Agrifoods, Newfoundland.
- Archibald, D.J., W.B. Whiltshire, D.M. Morris, and B.D. Batchelor. 1997. Forest management guidelines for the protection of the physical environment. Ontario Ministry of Natural Resources, Queens Press, Toronto.
- B.C. Ministry of Forests. 2001a. Soil conservation surveys guidebook. 2<sup>nd</sup> edition. For. Prac. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C. Forest Practice Code of British Columbia Guidebook.
- B.C. Ministry of Forests. 2001b. Soil conservation guidebook. 2<sup>nd</sup> edition. For. Prac. Br. Min. For., Victoria, B.C. Forest Practice Code of British Columbia Guidebook.
- Enns, D. 2002. Soil monitoring of forest harvesting impacts. Version 5.1, Forest Ecosystems Branch, Saskatchewan Environment, Prince Albert, SK.
- Grigal, D.F. 2000. Effects of extensive forest management on soil productivity. For. Ecol. Manag. 138:167-185.
- Jetté, J-P., H. L'Écuyer, A. Schreiber and N. Lafontaine. 2001. Soil and regeneration protection: How could we achieve these goals through an adaptive management approach? FERIC In-Woods Ground Disturbance Workshop, Nov. 7-8, 2001. Truro, N.S. (<http://www.feric.ca/en/ed/Jette.pdf>)
- Myhrman, D. 1990. Factors influencing rut formation from forestry machines. Proc. 10<sup>th</sup> Intern. Conf. ISTVS, Kpbe, Japan, August 20-24, 1990, p 467-475.
- Page-Dumroese, D., M. Jurgensen, W. Elliot, T. Rice, J. Nesser, T. Collins and R. Meurisse. 2000. Soil quality standards and guidelines for forest sustainability in northwestern North America. For. Ecol. Manage. 138:445-462.
- Powers, R.F., A.E. Tiarks and J.R. Boyle. 1998. Assessing soil quality: practical standards for sustainable forest productivity in the United States. Pp. 53-80 In E.A. Davidson, M.B. Adams and K. Ramakrishna (Eds.) The contribution of soil science to the development and implementation of criteria and indicators of sustainable forest management. SSSA Special Publ. No. 53, SSSA, Madison, WI.

## Bibliographie

- AHO, P. E., G. FIDDLER et G. M. FILIP, 1983. *How to Reduce Injuries to Residual Trees During Stand Management Activities*, USDA Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, General Technical Report PNW-156, 22 p.
- ANDERSON, H. W., 1994. « Some Implications of Logging Damage in the Tolerant Hardwood Forests of Ontario », *Logging Damage: The Problems and Practical Solutions*, J. A. Rice (ed.), Ontario Ministry of Natural Resources, Ontario Forest Research Institute, Forest Research Information Paper 117, p. 3-28.
- ANDERSON, H. W., 2007. Chercheur émérite, Ontario Ministry of Natural Resources, communication personnelle.
- ARCHIBALD, D. J., W. B. WILTSHIRE, D. M. MORRIS et B. D. BATCHELOR, 1997. *Forest Management Guidelines for the Protection of the Physical Environment*, Ontario Ministry of natural Resources, 47 p.
- ARNUP, R. W., 1998. *The Extent, Effect and Management of Forestry-Related Soil Disturbance, with Reference to Implications for the Clay Belt: a Literature Review*, Ontario Ministry of Natural Resources, Northeast technical report TR-037, 30 p.
- BLANCHE, C. A, T. E. NEBEKER, J. D. HODGES, B. L. KARR et J. J. SCHMITT, 1985. « Effect of Thinning Damage on Bark Beetle Susceptibility Indicators in Loblolly Pine », *Proceedings of the 3rd Biennial Southern Silvicultural Resources Conference*, E. Shoulders, ed, USDA Forest Service General Technical Report SO-54, p. 471-479.
- BRITISH COLUMBIA MINISTRY OF FORESTS, 2001. *Soil Conservation Surveys Guidebook - 2<sup>nd</sup> Edition* [en ligne], Victoria, BC, BC Ministry of Forests, Forest Practice Branch, Forest Practice Code of British Columbia Guidebook [[www.for.gov.bc.ca/tasb/legsregs/fpc/fpcguide/SOILSURV/Soil-toc.htm](http://www.for.gov.bc.ca/tasb/legsregs/fpc/fpcguide/SOILSURV/Soil-toc.htm)].
- CASTELLO, J. D., D. J. LEOPOLD et P. J. SMALLIDGE, 1995. « Pathogens, Patterns, and Processes in Forest Ecosystems », *BioScience*, vol. 45, p. 16-24.
- CLINE, M. L., B. F. HOFFMAN, M. CYR et W. BRAGG, 1991. « Stand Damage Following Whole-Tree Partial Cutting in Northern Forests », *North. J. Appl. For.*, vol. 8, p. 72-76.
- DEY, D., 1994. « Careful Logging, Partial Cutting and the Protection of Terrestrial and Aquatic Habitats », *Logging Damage: the Problems and Practical Solution*, J. A. Rice (ed.), Ontario Ministry of Natural Resources, Ontario Forest Research Institute, Forest Research Information Paper 117, p. 53-69.
- DUCKERT, D., 2007. Spécialiste forestier, Ontario Ministry of Natural Resources, communication personnelle.
- DWYER, J. P., D. C. DEY, W. D. WALTER et R. G. JENSEN, 2004. « Harvest Impacts in Uneven-Aged and Even-Aged Missouri Ozark Forests », *North. J. Appl. For.*, vol. 21, p. 187-193.

- ECOWOOD PROJECT, 2002. *Operations Protocol for Eco-Efficient Wood Harvesting on Sensitive Sites*, [En ligne] P. M. O. Owende, J. Lyons et S. M. Ward (ed.), Ecowood Partnership [www.ucd.ie/~foresteng], 74 p.
- FROELICH, H. A. et D. H. MCNABB, 1983. « Minimizing Soil Compaction in Pacific Northwest Forests », *Forest Soils and Treatment Impacts*, E. L. Stone (ed.), Proceedings of Sixth North American Forest Soils Conference, Knoxville, Tennessee, Univ. of Tenn. Conferences, June 1983, p. 159-192.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 1996. *Loi sur les forêts*, L.R.Q., c. F-4-1, Québec, Éditeur officiel du Québec, Les publications du Québec, dernière modification : 1<sup>er</sup> mai 2006 à jour au 3 octobre 2006, 124 p.
- GREACEN, E. L. et R. SANDS, 1980. « Compaction of Forest Soils: A Review », *Aust. J. Soil Res.*, vol.18, p. 163-189.
- GRIGAL, D., 2000. « Effects of Extensive Forest Management on Soil Productivity », *For. Ecol. Manage.*, vol. 138, p. 167-185.
- HAMILTON, P. S., 1999. *Coupes rases, progressives et de jardinage dans le bassin versant de Turkey Lakes*, FERIC, Division de l'Est, fiche technique FT-295, 6 p.
- HOUSTON, D. R., 1994. *Sapstreak Disease of Sugar Maple: Development Over Time and Space*, Radnor, PA, USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Research Paper NE-687, 19 p.
- JACKSON, R. B., J. CANADELL, J. R. EHLERINGER, H. A. MOONEY, O. E. SALA et E. D. SCHULZE, 1996. « A Global Analysis of Root Distributions for Terrestrial Biomes », *Oecologia*, vol. 108, p. 389-411.
- JANSSON, K.-J. et I. WÄSTERLUND, 1999. « Effect of Traffic by Lightweight Forest Machinery on the Growth of Young *Picea abies* Trees », *Scand. J. For. Res.*, vol. 14, p. 581-588.
- KARR, B. L., J. D. HODGES et T. E. NEBEKER, 1987. « The Effect of Thinning Methods on Soil Physical Properties in North-Central Mississippi », *South. J. Appl. For.*, vol. 11, p. 110-112.
- LOMBARD, K. 2001. « Pilot Study to Evaluate Tree Decline Associated with Partial Harvest Silviculture Within Northern Hardwood Forest Types », *Proceedings of Residual Stand Damage Workshop, August 16, 2001*, University of New Hampshire Cooperative Extension, Natural Resource Network Research Report, p. 7-16.
- LUSSIER, J. M., 2007. Chercheur scientifique, Centre canadien sur la fibre de bois, Service canadien des forêts, communication personnelle.
- MCNEEL, J., D. BRIGGS et B. PETERSON, 1996. « Damage to residual Trees During Partial Harvests: Measurement, Analysis, and Implications », *Planning and Implementing Forest Operations to Achieve Sustainable Forests: Proceedings of Papers Presented at the Joint Meeting of the Council of Forest Engineering and International Union of Forest Research*, St. Paul, MN, USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station, General Technical Report NC-186, p. 73-81.

- MEEK, P., 1997. *Mécanisation du jardinage en forêt feuillue avec une Timbo T-445*, FERIC, Division de l'Est, fiche technique FT-265, 12 p.
- MEEK, P., 2007. Chercheur, FERIC, communication personnelle.
- MILLER, R. E., S. R. COLBERT et L. A. MORRIS, 2004. *Effect of Heavy Equipment on Physical Properties Of Soil and Long-Term Productivity: A Review of Litterature and Current Research*, Research Triangle Park, N.C.: National Council for Air and Stream Improvement Inc., Technical Bulletin No 887, 76 p.
- MILLER, R. E., W. SCOTT et J. W. HAZARD, 1996. « Soil Compactage and Conifer Growth after Tractor Yarding at Three Coastal Washington Locations », *Can. J. For. Res.*, vol. 26, p. 225-236.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE (MRNF), 2006a. *Instructions relatives à l'application du règlement sur la valeur des traitements sylvicoles admissibles en paiement des droits - Exercice 2006-2007*, Québec, gouvernement du Québec, version du 18 avril 2006, 142 p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE (MRNF), 2006b. *Méthodes d'échantillonnage pour les inventaires d'intervention (inventaire avant traitement) et pour les suivis des interventions forestières (après martelage, après coupe et années antérieures) - Exercice 2006-2007*, Québec, gouvernement du Québec, version du 18 avril 2006, 253 p.
- NICHOLS, M. T., R. C. LFEMIN et W. D. OSTROFSKY, 1994. « The Impact of Two Harvesting Systems on Residual Stems in a Partially Cut Stand of Northern Hardwoods », *Can. J. For. Res.*, vol. 24, p. 350-357.
- NYLAND, R. D., 1994. « Careful Logging in Northern Hardwoods », *Logging damage: the Problems and Practical Solution*, J. A. Rice(ed.), Ontario Ministry of Natural Resources, Ontario Forest Research Institute, Forest Research Information Paper 117, p. 29-52.
- OHMAN, J. H., 1970. « Value Loss from Skidding Wounds in Sugar Maple and Yellow Birch », *Journal of Forestry.*, vol. 68, p. 226-230.
- OUMET, R., S. GUAY et P. LANG, 2005. *Évaluation de la distance minimale à respecter entre une tranchée et les arbres pour éviter la perte de vigueur des érables dans les érablières*, Québec, gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière, note de recherche forestière n° 130, 14 p.
- PARTINGTON, M. et J. LIRETTE, 2005. *Soil rutting Following Mechanized Single-Tree Selection Harvesting in the Great Lakes-St. Lawrence region of Ontario*, FERIC, Division de l'Est, Rapport interne IR-2005-06-08, 31 p.
- PARTINGTON, M. et J. LIRETTE, 2006. *Soil rutting Following Mechanized Single-Tree Selection Harvesting in the Great Lakes-St. Lawrence region of Ontario: Further Analysis of Results*, FERIC, Division de l'Est, addenda du Rapport interne IR-2005-06-08, 5 p.

- REISINGER, T. W., D. B. POWELL Jr., W. M. AUST et R. G. ODERWALD, 1994. « A Postharvest Evaluation of a Mechanized Thinning Operation in Natural Loblolly Pine », *South. J. Appl. For.*, vol. 18, p. 24-28.
- SCHREIBER, A., J.-P. JETTÉ et I. AUGER, 2002. *L'orniérage dans les CPRS et dans les autres coupes de régénération - Méthode de mesure utilisée en 2001*, Québec, gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de l'environnement forestier, 31 p.
- VAN REES, K., 2002. *Regulations and Guidelines for Soil Disturbance Across Canada*, University of Saskatchewan, Department of Soil Science, pour Weyerhaeuser Saskatchewan, 14 p. (annexe B).
- VASILIAUSKAS, R., 2001. « Damage to Trees Due to Forestry Operations and its Pathological Significance in Temperate Forests: A Literature Review », *Forestry*, vol. 74, p. 319-336.
- WHITNEY, R. D., 1991. « Quality of Eastern White Pine 10 Years After Damage by Logging », *For. Chron.*, vol. 67, p. 23-26.
- WHITNEY, R. D. et L. G. BRACE, 1979. « Internal Defect Resulting from Logging Wounds in Residual White Pine Trees », *For. Chron.*, vol. 55, p. 8-12.
- WÄSTERLUND, I., 1988. « Damages and Growth Effects after Selective Mechanical Cleaning », *Scand. J. For. Res.*, vol. 3, p. 259-272.
- WÄSTERLUND, I., 1992. « Extent and Causes of Site Damage Due to Forestry Traffic », *Scand. J. For. Res.*, vol. 7, p. 135-142.
- WÄSTERLUND, I., 1994a. « Forest Responses to Soil Disturbance Due to Machine Traffic », *Proceedings of Interactive Workshop and Seminar, FORSITRISK, on Soil, tree, machine interactions*, Feldafing, Federal Republic of Germany, 4-9 July, 1994, ECE/FAO/ILO, IUFRO P3.08-0, EU Concerted action CEET, 24 p.
- WÄSTERLUND, I., 1994b. « Impacts of Soil Disturbance on Forest and Forest Soils », *Proceedings of Interactive Workshop and Seminar, FORSITRISK, on Soil, tree, machine interactions*, Feldafing, Federal Republic of Germany, 4-9 July 1994, ECE/FAO/ILO, IUFRO P3.08-0, EU Concerted action CEET, 24 p.
- WÄSTERLUND, I., 2007. Professeur en technologie forestière, Suède, Swedish University of Agricultural Sciences, Suède, communication personnelle.