



Risques écologiques et environnementaux associés à la récolte de
biomasse intégrée aux coupes partielles dans l'érablière et la sapinière à
bouleau jaune de l'Ouest

– revue de littérature –

Préparée par

Edith Bégin, B.Sc. et Frédérik Doyon, ing. f., Ph.D.

Remis à Signature Bois Laurentides

Mai 2010

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier David Paré et Evelyne Thiffault de Ressources Naturelles Canada, Catherine Ste-Marie du service Canadien des Forêts, François Guillemette, Steve Bédard, Louis Duchesne et Rock Ouimet de la Direction de la Recherche du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec ainsi que Virginie-Arielle Angers qui ont su partager leurs connaissances et pour leur disponibilité tout au long du projet. Nous remercions aussi Pascal Gauthier de la Coopérative forestière des Hautes-Laurentides et Jesus Pascual Puigdevall du Centre canadien sur la fibre de bois pour leur apport tout au long de ce projet. Ce projet de revue de littérature a été financé par Signature Bois Laurentides. Nous remercions Mélissa Frandon-Côté pour la révision.

Citation

Bégin, E. et Doyon, F. 2010. Risques écologiques et environnementaux associés à la récolte de biomasse intégrée aux coupes partielles dans l'érablière et la sapinière à bouleau jaune de l'Ouest. Revue de littérature de l'Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Qc. Remis à Signature Bois Laurentides. Mai 2010. 27p.+ Annexe.

Résumé

La récolte de biomasse forestière comme source de bioénergie en Amérique du Nord soulève des inquiétudes et beaucoup de questionnement quant aux impacts de cette pratique sur l'intégrité des sols, la biodiversité, la structure et la régénération en essences forestières désirées. Des récoltes non adaptées aux conditions du site ou mal pratiquées peuvent a) causer une exportation d'éléments minéraux nutritifs non négligeable entraînant ainsi sur certains types de sols une baisse de la fertilité à court, moyen ou long terme, b) affecter la biodiversité faunique et floristique et c) entraver le succès de régénération en essences forestières désirées. Les impacts sont fortement spécifiques aux conditions locales des écosystèmes et dépendent de nombreux facteurs. Cette revue de la littérature soulève les impacts sur lesquels nous devrions porter une attention particulière dans le contexte spécifique de la récolte de biomasse intégrée aux coupes partielles dans l'érablière et la sapinière à bouleau jaune de l'Ouest. Ceux-ci sont l'appauvrissement des sols pauvres montrant déjà des signes de limitation nutritionnelle avant récolte (faible capacité d'échange cationique, acidification) et la taille des résidus de coupe après traitement pour le recrutement de grosses pièces de bois mort laissées sur place.

Table des matières

Remerciements.....	ii
Résumé	iii
Citation.....	iii
Table des matières	iv
1.0 Introduction	1
2.0 Impacts sur l'intégrité des sols	5
2.1 Teneur en éléments nutritifs dans la biomasse	5
2.2 Fertilité	6
2.3 Disponibilité des nutriments	6
2.4 Texture des sols.....	8
2.5 Compactage des sols.....	9
2.6 Érosion	10
2.7 Scalpage	10
2.8 Orniérage.....	11
3.0 Impacts sur la biodiversité.....	12
3.1 Petits mammifères et amphibiens.....	12
3.2 Oiseaux.....	13
3.3 Cortège floristique.....	13
4.0 Impacts sur la régénération en essences foerstières désirées et arbres résiduels.....	13
4.1. Semis et gaules	13
4.2. Dommages aux arbres résiduels	14
5.0 Bois morts.....	15
5.1. Débris ligneux.....	15
6.0 Sites sensibles.....	17
7.0 Mitigations.....	18
7.1 Sols.....	18
7.2 Régénération en essences forestières désirées.....	19
7.3 Sites sensibles.....	19
7.4 Biodiversité.....	20
7.5 Arbres résiduels.....	20
7.6 Indicateurs de suivi (minitorage).....	21
8.0 Conclusion.....	21
Références.....	22
Annexe (Tableau 4) : Tableau des mitigations et recommandations des impacts reliés à la récolte de biomasse.....	v

1.0 - Introduction

La biomasse est la masse totale des êtres vivants, qui inclut l'ensemble de la végétation (herbacée, arbustive, arborée) et de la faune, généralement rapportée par unité de surface (Cacot et al., 2006). Cependant, dans le contexte de foresterie, le terme biomasse s'adresse au poids sec de toute la matière organique, vivante ou morte, au-dessus ou au-dessous de la surface du sol (SCF, 2010). Au Québec, depuis 2008, la récolte de la biomasse forestière fait partie de la stratégie de développement industriel axée sur des produits à forte valeur ajoutée (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2009). Cet intérêt pour la biomasse forestière à des fins énergétiques sur une base industrielle n'est pas nouveau. Les premières préoccupations et recherches liées à la récolte de biomasse forestière ont débuté dans les années 1970, durant la première crise du pétrole, où la matière ligneuse était déjà vue comme une alternative intéressante et viable au pétrole (Thiffault et al., 2010). Avec la hausse récente du prix du pétrole et les exigences environnementales en lien avec les émissions de carbone dans l'atmosphère, la biomasse forestière à des fins énergétiques est de nouveau sur la sellette. Plusieurs industries de cette filière voient actuellement le jour ou sont la résultante de la conversion d'usines anciennement orientées dans la transformation de produits forestiers traditionnels.

Les régions des Laurentides et de l'Outaouais ne sont pas en reste concernant ce développement. Elles disposent de volumes substantiels sans preneur pour de la biomasse forestière présentant un potentiel important de source énergétique verte, particulièrement en essences feuillues, qu'il serait intéressant de mettre en valeur. En effet, cette nouvelle filière de valorisation de la biomasse présente beaucoup d'opportunités pour les entreprises qui oeuvrent à l'aménagement des forêts compte tenu du manque de débouchés pour les essences de feuillus durs de qualité inférieure à celles du déroulage et du sciage, particulièrement dans les unités d'aménagement forestier (UAF) situées dans les Laurentides et l'Outaouais. Déjà, le MRNF a récemment commencé à attribuer des permis de récolte de biomasse forestière pour ces deux régions, permettant la récolte de plus de 500 000 m³ de biomasse forestière.

La récolte intégrée de biomasse forestière est un nouveau plan d'action de valorisation de nos forêts et semble être une tutelle pour le maintien d'une industrie innovante, mais elle ne vient pas sans enjeux ni problématiques. Ainsi, bien que la récolte d'un tel volume de biomasse présente des opportunités de développement indéniables, elle soulève par ailleurs plusieurs questions quant à son intégration aux diverses activités qui se déroulent sur le territoire forestier public, aux conditions de sa rentabilité économique ainsi qu'aux effets de cette activité de récolte sur le fonctionnement et la biodiversité de l'écosystème forestier.

Afin de répondre à ces interrogations, un projet d'innovation et d'expérimentation opérationnelle de récolte intégrée de biomasse forestière a été mis sur pied via les initiatives ACCORD de l'Outaouais et des Laurentides. Il a été parrainé par le Réseau d'entreprises du secteur du Bois de l'Outaouais (RESBO) et par Signature Bois Laurentides. Le projet a été financé en partie par les CRÉs de l'Outaouais et des Laurentides tout en impliquant FPInnovations, FÉRIC, le Service d'innovation et d'expérimentation de la Coopérative forestière des Hautes-Laurentides (CFHL), MC Forêt, l'Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue (IQAFF), Uniboard Canada Division Panneaux et Lauzon Bois Énergie Recyclé.

Ce projet a été divisé en trois volets. Le premier volet visait à identifier les scénarios de récolte les plus appropriés sur une base théorique. Ce volet a permis d'identifier les approches de récoltes opérationnelles à expérimenter dans le cadre du deuxième volet. Le deuxième volet concernait l'expérimentation des procédés ayant été identifiés au premier volet à l'hiver 2010 dans les deux régions afin de documenter la double problématique de la récolte intégrée de la biomasse en forêts feuillues et mélangées dans le cadre d'interventions sylvicoles réalisées par coupes partielles et de la transformation de la biomasse en fonction des produits recherchés.

Le troisième volet concerne le travail présenté dans ce document. Comme cette nouvelle stratégie d'utilisation du bois vient rajouter une pression sur les ressources et le milieu forestier, la compréhension des impacts de la récolte de biomasse forestière sur le fonctionnement des processus écologiques et la résilience des écosystèmes est essentielle

au maintien d'une industrie forestière durable. Afin d'identifier quelles seraient les impacts négatifs potentiels sur le milieu forestier sous ce nouveau régime de récolte, il a été proposé d'effectuer, dans un premier temps, une revue de la littérature. Celle-ci permet ainsi de relever, dans la documentation pertinente, les risques écologiques et environnementaux associés à la récolte de biomasse intégrée aux coupes partielles dans l'érablière et la sapinière à bouleau jaune de l'Ouest.

Nous y présentons les problèmes appréhendés au niveau de l'intégrité des sols, de la biodiversité (flore, faune), du bois mort et de la régénération en essences forestières désirées dans le cas d'une récolte à grande échelle ainsi que les précautions à prendre pour s'assurer de garantir le développement de la filière biomasse de manière durable.

Nous voulons d'ores et déjà prévenir le lecteur que la majorité des études effectuées dans les années 1970 et suivantes concernaient surtout les plantations à des fins énergétiques ou bien la récolte de biomasse en forêt boréale après coupe totale. Peu d'études ont été effectuées sur les impacts liés à la récupération de biomasse forestière en forêt feuillue ou dans le contexte même de coupe partielle, même en forêt boréale. De plus, traditionnellement ces recherches étudiaient surtout les impacts sur le maintien de la fertilité des sols suite à la perte de nutriments (Hacker, 2005). Or les préoccupations écologiques et environnementales se sont multipliées depuis lors, particulièrement avec l'arrivée de l'aménagement écosystémique qui demande le maintien de la biodiversité et des processus écologiques des écosystèmes forestiers. Néanmoins, même si les impacts ne sont pas exactement les mêmes, les informations qui ont été retenues pour ce document peuvent servir comme source de réflexion valable pour identifier les risques écologiques et environnementaux les plus importants dans le contexte de la récolte de biomasse forestière intégrée lors de coupe partielle en forêt feuillue mixte.

Les éléments de risques retenus ont été compilés pour aider à identifier les caractéristiques des sites qui seraient jugés sensibles à la récolte intégrée de la biomasse forestière. De plus, durant cette revue de la littérature, nous avons aussi pris en note les pratiques de mitigation ainsi que les seuils suggérés par les auteurs des recherches compilées pour réduire les impacts sur les quatre thèmes explorés.

À la suite de l'identification des risques les plus importants, une validation experte a aussi été réalisée. Celle-ci a consisté à contacter des experts (Tableau 1) qui se spécialisent sur un des quatre thèmes explorés (intégrité des sols, biodiversité, bois mort, sites sensibles, et régénération en essences forestières désirées) et à leur demander leur avis sur les conclusions tirées de la littérature qui a été retenue dans cette revue.

Tableau 1 : Liste des experts spécialisés dans les domaines explorés

Nom des experts	Thèmes explorés
David Paré	Intégrité des sols
Catherine Ste-Marie	
Evelyne Thiffault	Sites sensibles
Rock Ouimet	
Virginie-Arielle Angers	Biodiversité et bois mort
François Guillemette	Régénération en essences forestières désirées
Louis Duchesne	
Steve Bédard	

2.0 - Impacts sur l'intégrité des sols

2.1 Teneur en éléments nutritifs dans la biomasse

Tous les compartiments de l'arbre n'ont pas la même teneur en éléments nutritifs. Les aiguilles, feuilles et la végétation du sous-bois (herbacées et arbustes) contiennent une grande concentration en éléments nutritifs et contribuent annuellement de façon importante au cyclage des nutriments (Hacker, 2005). Dans l'arbre, l'écorce, les branches fines, le feuillage (Cacot et al., 2006, Cramer 1974), les houppiers (Louis Duchesne, communication personnelle), les aiguilles ainsi que la cime (Swedish National Board of Forestry, 2002) ont une teneur en éléments minéraux très élevée. Aussi, la durée de disponibilité des nutriments contenus dans les troncs est plus longue que celle des branches et du feuillage dû à une décomposition plus lente des pièces volumineuses (Hacker, 2005).

De plus, les espèces ne sont pas toutes équivalentes en termes de séquestration de nutriments dans leurs compartiments (Tableau 2). Par exemple, une étude effectuée dans la sapinière à bouleau blanc du Québec a démontré que les pins gris étaient classés comme étant un peuplement à faible risque lors de récolte de biomasse forestière. Ceci serait dû à sa faible teneur en nutriments dans les branches et de feuillages (Paré et al, 2002).

Tableau 2 : Nutriments retrouvés au dessus du sol dans différentes forêts matures.

Principales espèces	Azote (kg/ha)	Calcium (kg/ha)	Potassium (kg/ha)	Magnésium (kg/ha)	Phosphore (kg/ha)
<i>Abies balsamea</i> et <i>Picea rubens</i>	410	540	240	60	60
<i>Acer saccharum</i> , <i>Betula alleghaniensis</i> , <i>Fagus grandifolia</i>	260	360	140	40	20
<i>Acer saccharum</i> , <i>Betula alleghaniensis</i> , <i>Fagus grandifolia</i>	350	380	160	40	40
<i>Quercus spp.</i> <i>Acer rubrum</i> , <i>Bétula lenta</i> <i>Carya spp.</i>	300	590	180	40	20

Tiré de Federer et al., (1989).

2.2 Fertilité

La récolte de biomasse comporte des risques connus pour l'intégrité écologique, soit le compactage et l'orniérage, l'érosion, la perte d'éléments nutritifs (Thiffault et al., 2010) et la perte de matière organique qui peuvent tous affecter la fertilité des sols (Cacot et al., 2006). « La fertilité chimique du sol dépend presque exclusivement du recyclage biologique des matières organiques et peut être fortement menacée par des prélèvements de biomasse intensifs ou fréquents » (Landmann et al., 2009). Cependant, ce cyclage est très complexe car « chaque nutriment a sa propre chimie unique dans le sol, ses propres rapports avec la lithologie et les entrées atmosphériques, et ses propres modèles de recyclage par le sol et la végétation » (Thiffault et al., 2010). Un sol pauvre ou mal balancé en nutriments peut rapidement causer des dommages nutritionnels aux arbres présents sur un site (Thiffault et al., 2010). La réduction de la disponibilité des nutriments peut se traduire par une réduction de la croissance. Et dans le cas de déséquilibre de l'offre nutritionnelle, on peut assister à l'apparition de symptômes de carence (Landmann, et al., 2009), une croissance anormale et des problèmes de reproduction (Raven et al., 2000). Des arbres qui démontrent le rabougrissement des tiges et des feuilles, des nécroses localisées et le jaunissement des feuilles sont tous des symptômes de carences nutritives (Raven et al., 2000). Les peuplements qui présentent ces symptômes devraient être exclus dans le cadre d'une récolte de biomasse intégrée puisqu'il pourrait très certainement y avoir une détérioration encore plus grave de l'équilibre nutritionnel. Les conséquences sur la fertilité sont généralement mineures à court terme, mais deviennent importantes à long terme lorsque le prélèvement se répète sur plusieurs rotations. Comme dans le jardinage, la rotation des coupes partielles est courte (de 25 à 35 ans) « le risque de perte de fertilité dans les sites sensibles devient quasi aussi important que si le peuplement avait subi une coupe totale » (Rock Ouimet, communication personnelle).

2.3 Disponibilité des nutriments

«Le bilan nutritif des forêts comprend plusieurs facteurs, y compris les sources d'éléments nutritifs, leur utilisation et leurs pertes » (Welke et James Fyles, 2005). Les

éléments nutritifs sur les sites forestiers existent sous trois formes; inorganique ou minérale (particules du sol, roches et croûte terrestre), organique (végétal et animal) et ionique (forme disponible pour les plantes) (Hacker, 2005). Certaines formes de nutriment sont peu affectées lors des activités de récolte de biomasse. C'est le cas des nutriments présents dans la matière inorganique (roches, particules du sol) puisque les sols forestiers ne sont pas sujets à des procédures d'extraction. Néanmoins, les nutriments inorganiques sont naturellement moins disponibles pour les plantes et prennent un certain temps à se minéraliser (Hacker, 2005). Ce qui procure à long terme la garantie d'un réservoir de sels minéraux, de complexes métalliques et de composés moléculaires d'éléments non-métalliques si aucune extraction du sol et des roches n'est effectuée sur les sites de récolte.

En forêt feuillue, la récolte des petites branches dans les houppiers constitue le risque d'exportation de nutriments le plus important dans le cas de la récolte de biomasse intégrée aux opérations de coupes partielles. Dans Paré et al., (2002), la récolte d'arbre entier dans la forêt boréale a fait augmenter l'exportation d'azote, de phosphore, potassium, calcium et magnésium par rapport à la récolte du tronc uniquement. Cacot et al., (2005), arrivent sensiblement à la même conclusion : « La récolte des houppiers, ramassés séparément du tronc ou par arbre entier, s'accompagne d'une forte exportation minérale ». Cependant, les conséquences sont différentes selon la composition des peuplements, les bilans des nutriments étant différents pour chacun d'eux selon la composition en espèces (Hacker, 2005). Selon Freedman (1991), l'intensité des coupes de jardinage et la récolte par arbre entier (incluant les parties dont le diamètre est inférieur à 9 cm) auraient comme conséquence un appauvrissement en éléments nutritifs plus élevés qu'une récolte par tronc entier (diamètre au fin bout de 10 ou 20 cm). La situation pourrait davantage s'aggraver pour le calcium et le magnésium puisqu'ils sont des composantes importantes pour la nutrition et ils servent à la neutralisation de l'acidité des pluies. Sans cette dernière fonction de neutralisation, l'acidité accentue le lessivage des nutriments et par le même fait, limite la disponibilité en nutriments (effet de rétroaction positive). Les dépôts atmosphériques totaux en calcium sont trop faibles pour compenser ces pertes (Ouimet et Duchesne, 2009). De plus, une carence en magnésium

peut produire une diminution de la production de chlorophylle ou l'arrêt de sa synthèse et peut entraîner la chlorose (Raven et al., 2000).

Hornbeck et Kropelin (1982) ont démontré, lors d'une récolte d'arbre entier (96 % de biomasse) dans un peuplement feuillu, que l'estimation de la récolte de nutriments disponible est de 30 % pour le calcium et 85 % pour le potassium puisque les impacts sur ceux-ci sont de l'ordre de quelques pourcent. D'ailleurs, Boyle et al. (1973), ont observé que le calcium ne sera pas limité avant 270 ans dans une forêt mixte suite à la récolte d'arbres entiers étant donné que la quantité en kg/ha est assez élevée actuellement. Toutefois, l'étude de Federer et al. (1989) démontre que le calcium est très affecté par des récoltes par arbre entier subséquentes. La perte est multipliée par deux sur 120 ans en comparaison avec aucune récolte. C'est pourquoi le calcium, à long terme, pourrait devenir un problème si des mesures de mitigation ne sont pas implantées. Concernant le phosphore, l'enjeu est légèrement différent. La quantité de phosphore, contenu dans les arbres entiers de peuplements feuillu est plus faible (27 kg/ha) comparativement au potassium (160 kg/ha), calcium (443 kg/ha) et azote (303 kg/ha) (Federer et al., 1989). Des résultats semblables ont été observés dans l'étude de Morrison (1990). Le phosphore qui est localisé dans le tronc et les branches est susceptible d'être retiré lors de récoltes. Cette perte peut être minimisée si seulement les troncs sont récoltés (Morrison, 1990). Néanmoins, l'évaluation quantitative des impacts de la récolte intégrée de biomasse forestière peut être trompeuse si la quantité de matériel organique qui a été récoltée ou laissée sur un site n'est pas adéquatement répertoriée (Thiffault et al., 2010).

2.4 Texture des sols

La taille des particules du sol joue un rôle majeur dans les risques d'orniérage et de compactage. En effet, les particules plus grossières comme les cailloux et sables sont plus résistantes aux dommages causés par le poids de la machinerie forestière que les particules plus fines comme l'argile ou les sols organiques (Institut canadien de recherche en génie forestier, 2007). Cependant, les sols de texture grossière (régosol, solonetz, etc.) tolèrent mal la récolte des résidus (Turbis, 2008) puisque leur concentration en nutriment est moins élevée (Ministère de l'Agriculture du Canada, 1992). Il en est tout autre pour

les sols de texture plus fine (brunisol, chermozen, gleysol, luvisol, etc.) qui supportent mieux l'exportation des nutriments lors des récoltes (Turbis, 2008). De plus, les sols contenant des matériaux riches et altérables comme le calcaire disposent d'un fort pouvoir tampon vis-à-vis de l'acidité et une CEC plus élevée, leur permettant de mieux résister aux exportations en nutriments. Ceux contenant des matériaux pauvres et peu altérables comme le sable et le schiste supportent très mal l'acidification (Landmann, G. et al., 2009).

2.5 Compactage des sols

Le prélèvement de la biomasse et toute autre opération forestière de récolte requièrent généralement de la machinerie lourde. Elle affecte la surface du sol en le compactant (Landmann, G. et al., 2009) et en le scalpant. (Deconchat, 2001). Cela induit une altération de sa structure et réduit sa porosité et son aération (diminution des espaces lacunaires) qui ont des conséquences à long terme (Godefroid et Koedam, 2003 ; Landmann, G. et al, 2009; Institut canadien de recherche en génie forestier, 2007). On peut y observer un ralentissement des transferts (drainage) d'eau et de gaz dans le sol, des phénomènes d'engorgement et d'asphyxie plus fréquents ainsi qu'une augmentation de la résistance du sol à la pénétration (Landmann, G. et al., 2009). Ainsi, ces facteurs ont des répercussions sur le succès d'assimilation, de croissances des racines (restriction) et par conséquent sur la capacité de régénération des peuplements forestiers. Les dommages sont plus nombreux lorsque le sol est gorgé d'eau due à la diminution de la rigidité du sol (Kirby et Kirchhoff, 1990) et lorsqu'il y a augmentation du nombre de passage de la machinerie dans un sentier non gelé, humide ou de pierrosité mince (Institut canadien de recherche en génie forestier, 2007; François Guillemette et Steve Bédard, communication personnelle). Aussi, le compactage des sols a une influence sur la répartition de l'abondance entre les espèces vasculaires et aurait un moins grand effet sur le nombre d'espèces. « Ainsi, certaines espèces très recouvrantes et/ou adaptées à l'hypoxie peuvent être favorisées, d'autres à l'inverse sont sensibles au tassement » (Godefroid et Koedman, 2004). L'étude de Godefroid et Koedam (2003) a démontré que *Carex remota*, *C. sylvatica*, *Rumex sanguineus* et *Veronica montana* ont une réponse de croissance fortement positive lors de compaction tandis que *Epilobium montanum*, *Carex strigosa* et

Mycelis muralis ont eu des réponses négatives au compactage. De ce fait, on pourrait observer, à long terme, un changement dans la composition floristique des aires de récolte. Par conséquent, certaines plantes forestières sensibles au compactage pourraient éventuellement être remplacées par une plante non forestière tolérante au compactage. Le compactage peut aussi induire des changements dans la quantité et l'équilibre des hormones des plantes. En effet, on peut observer l'augmentation en acide abscissique (agis comme hormone de stress, de dormance et d'inhibition de germination) et en éthylène (Kozlowski, 1999).

2.6 Érosion

Certaines pratiques forestières peuvent amener un risque d'érosion. Ces risques sont plus élevés sur des pentes fortes (Agence régionale de mise en valeur des forêts privées outaouaises, 2001; David Paré, communication personnelle). Dans Croke et al., (1999), la machinerie lourde d'exploitation semble être responsable d'une grande partie de l'érosion hydrique des collines et des moyennes montagnes. Particulièrement celle de l'ordre de 20 à 45 %. Afin de prévenir l'érosion lors d'exploitation, Gauquelin et Courbaud (2006) suggèrent de maintenir un couvert végétal permanent et des seuils de pente adaptés à la texture et la piérosité des sites. La récolte par arbre entier pour des fins d'exploitation de la biomasse peut produire un phénomène d'accélération de l'érosion suite à la réduction de la capacité de rétention des particules si la couche de protection du sol (végétation et humus) est détruite (scalpage).

2.7 Scalpage

Le scalpage est l'effet de fraisage et de laminage à la surface du sol provoqué par le glissement des roues motrices qui tournent sans avancer. Cette action affecte la surface du sol (Deconchat, 2001). Il en résulte l'arrachage et la destruction de la litière et une partie des racines qui se trouvent à la surface (Rotaru, 1985). Le scalpage affecte la température du sol en augmentant celle-ci suite à l'enlèvement de la couche protectrice qu'est l'humus (Frey et al., 2003). Dans l'étude de Frey et al., (2003), le scalpage a augmenté la disponibilité du calcium, du magnésium et du nitrate, mais diminué celle du potassium et du phosphore lors de coupes partielles d'un peuplement mixte. Comme la

récolte de biomasse forestière pourrait affecter négativement le phosphore (Morrisson, 1990), le scalpage viendrait alourdir les conséquences. En revanche, le scalpage semble être profitable pour le *Populus* spp. Selon Frey et al., (2003), il augmenterait la densité de ceux-ci, en favorisant le drageonnement des racines exposées. On pourrait alors penser que cela aurait aussi le même effet sur le drageonnement du hêtre car celui-ci est stimulé par les blessures aux racines.

2.8 Orniérage

Une ornière comprend un creux et souvent un ou deux bourrelets latéraux (Rotaru, 1985). Elles peuvent être formées (David Paré, communication personnelle) lors du passage de la machinerie lourde d'exploitation créant des déstabilisations de la couche organique, modifiant l'écoulement de l'eau, augmentant les risques d'érosion (Agence régionale de mise en valeur des forêts privées outaouaises, 2001) et pouvant affecter la productivité à long terme des sols forestiers (Ressources naturelles, 2001). Finalement, la saison d'intervention a aussi un effet déterminant sur le risque de compaction des sols et de l'orniérage. En effet, l'automne (novembre à mi-décembre) et le printemps (mai-juillet) sont les saisons les plus risquées pour les effets d'orniérage causés par le débardage des tiges dû à une humidité des sols plus élevée. D'autre part, les sols sont mieux protégés durant la saison hivernale lorsque le sol est gelé et que le couvert de neige est épais (François Guillemette et Steve Bédard, communication personnelle).

Ainsi, la différence de compactage et de risque d'érosion, d'orniérage et de scalpage entre les opérations régulières et celles impliquant la récolte intégrée de la biomasse se résume au nombre de passages et le poids des charges lors du débardage de la biomasse. De plus, cela dépend aussi de la forme de débardage qui est utilisée : arbres entiers ou troncs entiers. On peut supposer que la réduction du diamètre fin bout lors de la récolte intégrée de la biomasse aura pour effet d'augmenter le nombre de petites pièces, et par conséquent, augmenter le nombre de passages requis pour débarder le matériel récolté. Cependant, les travaux effectués dans le cadre du Volet II de ce projet pourront aider à répondre à cet élément.

3.0 Impacts sur la biodiversité

La préservation de la biodiversité fait l'objet d'une attention croissante à plusieurs échelles. Elle est à la base de tout fonctionnement des écosystèmes. « L'utilisation intensive de la biomasse peut être l'une des causes de la dégradation de la biodiversité par le biais de changements dans la nature et l'intensité de l'utilisation de sols » (Landmann, G. et al., 2009). Des impacts pourraient survenir, à long terme, à la suite de récoltes subséquentes. Ainsi, on pourrait observer des pertes d'habitats pour certaines espèces et engendrer des disparitions locales (Virginie-Arielle Angers, communication personnelle). Le bois mort, particulièrement celui de grande dimension, est important pour la flore et la faune et contribue énormément à la diversité biologique (Swedish National Board of Forestry. 2002; Hagan et Grove, 1999). L'extraction de la biomasse forestière peut freiner l'effort mis sur l'augmentation de la rétention de la quantité de bois mort pour prévenir la perte de biodiversité (Verkerk et al., 2009).

3.1 Petits mammifères et amphibiens

Les amas de houppiers au sol sont des abris (microhabitat) et sont une ressource trophique pour les vertébrés tels que les petits rongeurs vulnérables à la prédation (Ecke et al., 2002; Landmann et al., 2009; Hacker 2005; Berg et al., 1994; Harmon et al., 1986) ainsi que les amphibiens (Hagan et Grove, 1999). « Le maintien des rémanents forestiers ont, par exemple, un effet positif sur l'abondance totale des troglodytes des forêts » (Hanowski et al., 2003 dans Landmann et al., 2009). La marte américaine ainsi que les membres de la famille des *Mustelidae* utilisent des tunnels au-dessous des arbres suspendus durant l'hiver pour se déplacer et y vivre (Hagan et Grove, 1999). Comme la récolte de biomasse peut diminuer le pH des sols, elle peut devenir un problème pour certaines espèces. Wyman et Jancola, (1992) ont observé que la densité et la richesse des espèces d'amphibiens diminuent beaucoup dans les habitats forestiers caractérisés par des sols acides. Ils ont apporté l'hypothèse que les sols de pH acide sont des facteurs limitants qui régularisent la distribution des amphibiens.

3.2 Oiseaux

Il existe très peu d'exemples d'impacts concernant les récoltes de biomasse forestière sur les oiseaux. Toutefois, les informations que nous avons pu recueillir peuvent nous apporter des pistes. Les arbres morts sur pied sont très importants pour certaines familles d'espèces, dont les *Picidae*, les *Turdidae* et les *Strigidae*. Ils servent de nidification, de juchoir, d'abri (Du Plessis, 1995; Office of the State Forester, 2008) et comme source de nourriture (Villard et Guénette, 2005). La récolte de ces éléments de structure de l'habitat peut réduire la qualité des habitats et par le fait même la richesse des espèces aviaires (Machmer 2002).

3.3 Cortège floristique

La récolte de biomasse forestière semble avoir des impacts à la fois défavorables et favorables sur la richesse des plantes. Aström et al. (1995) ont observé, lors de coupes totales, que la récolte de biomasse est défavorable pour les bryophytes forestières et celles d'habitats ouverts, les hépatiques (perte d'une espèce sur trois) et les mousses, mais ne l'est pas pour les plantes vasculaires. Toutefois, Deconchat et Baient 2001 ont observé que le maintien des houppiers est défavorable à la richesse de la flore vasculaire en ralentissant leur prolifération.

4.0 Impacts sur la régénération en essences forestières désirées et arbres résiduels

4.1 Semis et gaules

Le succès de régénération en essences forestières désirées et de la survie des semis sont particulièrement dépendants des conditions des microclimats des sites de récolte (Hacker, 2005). En effet, la température du sol et l'humidité sont étroitement liées à la décomposition et le cycle de nutriments. La disponibilité de ceux-ci devient influencée et par le fait même affecte les jeunes peuplements. De plus, le degré de changements des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol forestier dépendent aussi de l'intensité des coupes (Swank et Vose, 1988). En effet, les coupes partielles (coupe sélective légère) n'ont pas d'effet significatif sur l'humidité.

La rétention et la récolte peuvent toutes deux, dans certaines situations, avoir un impact important sur le succès de la régénération en essences forestières désirées. Les nutriments sous forme ionique supportent la croissance des plantes et peuvent être perdus suivant une perturbation par récolte. Une telle perte peut avoir un impact important sur le succès de la régénération (Hacker, 2005). De plus, une grande concentration de résidus lourds peut former une barrière physique, ce qui rend l'implantation des graines difficile (Ruth and Harris, 1975) tandis que la récolte complète des gros résidus expose les semis au soleil et à la chaleur, ce qui peut freiner leur succès de survie (Hacker, 2005). Une température au dessus de 140 °F produit des blessures par rupture des protéines (Swank et Vose, 1988). «Les houppiers jouent le rôle d'isolant thermique. Les enlever provoque une augmentation des écarts de température au niveau du sol préjudiciable à la régénération naturelle » (Cacot et al., 2006). De plus, le bois mort au sol contribue à la protection des semis ligneux lors de grand vent (Proe et al., 1994). Aussi, durant la récolte, les machineries utilisées peuvent écraser les semis et gaules, ce qui occasionne une perte pour le recrutement des arbres des futures récoltes et vient à l'encontre des efforts mis sur le maintien d'une forêt productive.

La croissance de la végétation suivant une récolte est essentielle pour le rétablissement du régime de nutriments et des conditions microclimatiques dans un écosystème (Smith, 1985; D'Avignon et Ouimet, 2008). Une installation trop lente de la régénération risquerait une perte importante de nutriments par lessivage (D'Avignon et Ouimet, 2008). En somme, un sol fertile et adéquatement irrigué procure aux semis, gaules et arbres une plus grande résistance aux perturbations environnementales (Agence régionale de mise en valeur des forêts privées outaouaises 2001).

4.2 Dommages aux arbres résiduels

Des impacts sur les arbres résiduels sont aussi à envisager. En effet, des blessures peuvent être portées aux arbres (Rock Ouimet, communication personnelle) créant des conditions favorables à la coloration des bois et à la carie (François Guillemette et Steve Bédard, communication personnelle; Shigo 1966). Le nombre de passages de la machinerie dans un sentier ainsi que le type de débardage (arbres entiers vs. troncs

entiers) augmente aussi le risque de blesser les arbres. Ainsi, plus le volume de bois récolté est élevé, plus il est risqué de blesser des arbres (François Guillemette et Steve Bédard, communication personnelle). Toutefois, certains types de coupe comme le procédé de récolte de bois court (abatteuse multifonctionnelle et porteur sur roues) cause très peu de blessures aux arbres résiduels (François Guillemette et Steve Bédard, communication personnelle).

La saison d'intervention a aussi un effet déterminant sur le risque de dommages portés aux arbres (Hacker 2005; Swank et Vose, 1988). En effet, le printemps et l'été (jusqu'à la fin d'août) sont les saisons les plus critiques pour les blessures causées aux arbres. La sève qui monte dans les arbres à cette période de l'année rend leur écorce plus fragile et diminue la capacité de l'arbre à se protéger des blessures. D'autre part, l'hiver est la saison idéale. Les arbres sont plus difficiles à blesser durant cette période (François Guillemette et Steve Bédard, communication personnelle).

5.0 Bois morts

5.1 Débris ligneux

Le bois mort peut prendre plusieurs formes; arbres morts sur pied, arbres tombés au sol, branches cassées (Hagan et Grove, 1999). Le bois mort au sol contribue à la structuration des couches superficielles du sol (Mahendrappa et Kingston, 1994), procure une stabilité dans les pentes en diminuant l'érosion (Hagan et Grove, 1999) et procure (résidus fins) une protection pour le sol en diminuant l'évaporation (Cramer, 1974). La décomposition des débris ligneux joue un des rôles les plus importants, celui de supporter la vie des arbres encore vivants en recyclant les nutriments (Hagan et Grove, 1999). En effet, comme les nutriments (de gros calibres) prennent un certain temps à retourner dans le sol, le bois mort procure une stabilité à long terme dans le cycle des nutriments.

«Le pic en volume de production de débris ligneux dépend du type de forêt, l'historique des espèces et le genre de perturbation propre à la région » (Tritton 1980 in : Hagan et Grove, 1999). Le climat, la topographie et le sol sont d'autres facteurs qui peuvent avoir une influence sur les caractéristiques du bois mort telle la densité, hauteur

et quantité (Vaillancourt et al, 2008). Le volume le plus bas de débris ligneux Tritton (1980) et de matière organique (Morrison, 1990) a été répertorié dans les forêts de chêne de nord-est américain. De ce fait, la récolte de biomasse dans ces forêts pourrait être à risque. «Dans les peuplements d'hêtre, de bouleau et d'érable du nord-est, le volume de débris ligneux subit un pic à environ 100 ans d'âge du peuplement pour ensuite subir une baisse et se stabiliser pour une longue période ou jusqu'au moment d'une perturbation majeure (Tritton 1980 in : Hagan et Grove, 1999) ». Ce qui vient rejoindre l'estimation de Busing et al. (1992), comme quoi la biomasse des vieux peuplements à dominance feuillus est plus élevée que ceux des jeunes peuplements correspondants. En outre, le volume de débris ligneux augmente dramatiquement à la suite d'une forte perturbation telle que des chablis, feux et infestations d'insectes (Hagan et Grove, 1999), des perturbations que l'on retrouve dans l'érable et la sapinière à bouleau jaune. Les sapins et épinettes sont particulièrement touchés par les épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Morin et al., 2008), ce qui génère des apports considérables en débris ligneux.

Dans le cadre d'une récolte de biomasse intégrée à la coupe partielle, le bois mort laissé au sol sera de diamètre inférieur comparativement à ce que l'on pourrait retrouver en coupe partielle traditionnelle. Le volume total laissé sur place sera donc par le fait même diminué. Le risque accru dans ce type de récolte réside donc dans l'extraction d'un potentiel nutritionnel (perte d'un approvisionnement de nutriment disponible à long terme) (Hagan et Grove, 1999) puisque le diamètre au fin bout des houppiers récoltés sera inférieur. Un second risque réside dans la perte d'habitats pour les petits mammifères, amphibiens et reptiles puisque les houppiers de gros volumes seront récoltés et que seules les branches de petit diamètre resteront sur place. Celles-ci sont peu utilisées par ces classes d'organismes et sont non-propice à un habitat. Cela pourrait engendrer une diminution de la biodiversité locale (Virginie-Arielle Angers et Evelyne Tiffault, communication personnelle). Cependant, les oiseaux ne seront probablement pas plus affectés par ce type de coupe que par celle traditionnelle puisque le tronc sera récolté dans les deux cas.

« Le défi pour les forestiers est de comprendre la dynamique naturelle des débris ligneux pour les différents types de forêts et d'intégrer ses connaissances à la récolte de biomasse forestière et l'aménagement » (Hagan et Grove, 1999).

6.0 Sites sensibles

Certains sites sont plus sensibles que d'autres à la récolte de biomasse forestière du point de vue de l'intégrité des sols. On peut classer les sites sensibles en cinq catégories (Ouimet et Duchesne, 2009; CERFO, 2009).

- ? Les sites au dépôt très mince (épaisseur du sol < 25 cm).
- ? Les sites au dépôt mince à épais et de texture grossière ou très grossière (proportion de sables > 70 %).
- ? Les sites dont le drainage est mauvais.
- ? Les sites sur sol ombrotrophe ou organique épais (épaisseur > 1 m).
- ? Les sites à pH faibles (< 4,8).

On retrouve un seuil limite de réserves de minéraux nutritifs dans les sites dont le dépôt est mince (Ouimet et Duchesne 2009). Les sols à texture grossière comme le régosol et le solonetz ont généralement une faible concentration de minéraux nutritifs (Ministère de l'Agriculture du Canada, 1992) et son sujet à l'acidification (Ouimet et Duchesne 2009). De plus, un mauvais drainage (classe 4 à 6) (Agence régionale de mise en valeur des forêts privées outaouaises, 2001) limite la capacité des racines à explorer le sol en profondeur ce qui diminue l'accès aux éléments nutritifs (Ouimet et Duchesne 2009). Les sols ombrotrophes, comme les tourbières caractérisées par une très forte teneur en matière organique (Berthet, 2006), sont des écosystèmes particulièrement sensibles à la récolte de biomasse dus à leur teneur en acidité et en eau (Ouimet et Duchesne 2009; Couillard et Grondin, 1986). Certains sites pourraient avec le temps dépasser leur capacité à résister aux dépôts acides (pouvoir tampon des sols) et par le fait même, devenir des zones où la récolte de la biomasse est risquée pour l'intégrité du milieu. Ouimet et Duchesne (2009) ont qualifié les types de végétations selon leur excès d'acidité (>200 éq ha⁻¹a⁻¹). Certains types écologiques ainsi que plusieurs sous-régions de l'érablière et sapinière à bouleau jaune sont qualifiés de sites sensibles à la récolte de

biomasse (tableau 3). Toutefois, le temps requis pour diminuer la qualité et la productivité de ces sites n'est pas connu.

Tableau 3 : Type et sous-région écologique de l'érablière et de la sapinière à bouleau jaune qualifié comme sites sensibles (Ouimet et Duchesne, 2009).

Domaine bioclimatique	Type écologique	Sous-région écologique
Érablière à bouleau jaune	F30	2bT 4cT
	F31	3aS 4bT 4cM 4dT
	F35	4cM
	FE3H	4dM
Sapinière à bouleau jaune	MS11	3cM 4bT
	MS12	3aM

Les sensibilités des sites en ce qui a trait à la biodiversité, le bois mort et la régénération des essences forestières désirées n'ont pas fait l'objet d'une évaluation pouvant mener à une classification de susceptibilité sur la base de ces aspects.

7.0 Mitigations (voir Tableau 4 en annexe)

7.1 Sols

« La distribution des nutriments dans les différentes parties d'un arbre varie de façon importante d'une espèce à l'autre ». Cela suggère que les recommandations pour la récolte de biomasse devraient être en fonction non pas seulement de la productivité d'un site, mais aussi en fonction des espèces déjà présentes (Hacker 2005). Des choix dans la récolte des houppiers en fonction de la richesse des sols devraient être pris (Cacot et al., 2006). Afin de maintenir un sol productif et de diminuer les impacts de récolte de biomasse, la rétention de petites branches, rameaux, aiguilles et feuillages devrait être envisagée puisqu'ils sont les parties les plus importantes à conserver d'un point de vue nutritionnel (Miller et al., 1974; Hacker, 2005; François Guillemette et Steve Bédard, communication personnelle). Selon Ruth et Harris, (1975), seuls les résidus de gros calibres devraient être récoltés sur les sols déficients en nutriments, faibles en argile et en matière organiques. Hagan et Grove (1999) suggèrent de ne pas empiler les débris

ligneux, mais de les disperser sur le site de récolte et que les souches devraient rester là où elles sont. Quelques débris ligneux devraient être laissés sur le site ainsi que le bois mort naturellement tombé au sol (Evelyne Tiffault, communication personnelle), car ils persistent dans le temps et procurent un approvisionnement en nutriments sur une échelle de temps plus longue puisque la minéralisation y est plus lente. Dans le cas de sol acide, la rétention d'une certaine quantité de biomasse permettrait d'augmenter le pH de la couche d'humus (Nykvist et Rosen (1985) et ainsi acquérir un meilleur équilibre avec un relargage des nutriments mieux répartis dans le temps.

7.2 Régénération en essences forestières désirées

Afin de protéger la régénération préétablie, les déplacements de la machinerie forestière devraient être limités dans les zones régénérées du peuplement et des sentiers pour le débardage devraient être désignés et s'en tenir qu'à eux seuls (Institut canadien de recherche en génie forestier, 2007). Les zones qui sont déjà en envahissement par la régénération du hêtre, ou en voie de l'être, devraient être évitées puisque le débardage par arbres entiers aura pour effet de stimuler encore plus de drageonnement du hêtre.

7.3 Sites sensibles

M. Rock Ouimet a proposé l'approche d'identification des charges critiques. Celle-ci vise à éviter les sites dont les sols risquent d'être lessivés de leurs éléments nutritifs. Quelques documents traitent de ce sujet, dont Ouimet (2005); Ouimet et Duchesne (2008); le conseil canadien des ministères de l'Environnement (2008) et Dupont et al., (2002). Le MRNF a produit une liste de sites sensibles à la récolte de biomasse basée sur la fertilité à long terme des sols forestiers valable pour l'aménagement par coupe partielle (Rock Ouimet, communication personnelle). De plus, il existe l'approche de caractérisation de sites basée sur la texture des sols (Thiffault, Morissette et coll., 2009). Cette dernière option est fondée sur des lignes directrices des mesures générales applicables pour la récolte de biomasse établie ailleurs dans le monde. Cette approche a été construite principalement pour la forêt boréale, mais peut servir de première approche pour la forêt feuillue (Evelyne Tiffault, communication personnelle). « Cependant, il serait possible d'exploiter des sites sensibles à condition d'apporter des

mesures de mitigation, par exemple en rallongeant la période de révolution ou en y rapportant sur le site les éléments minéraux qui ont été exportés » (Rock Ouimet, communication personnelle). De plus, le Service Canadien des Forêts développe actuellement des méthodes pour cartographier les sols sensibles (David Paré, communication personnelle).

7.4 Biodiversité

Afin de minimiser les perturbations et la perte d'habitat pour les organismes utilisant le bois mort, des sections de sites sans récolte de biomasse (témoins) devraient être préétablies et suivies à long terme (Virginie-Arielle Angers, communication personnelle). Des gros chicots devraient être laissés sur place et l'exclusion d'une rotation de récolte de biomasse (une rotation sur 3 par exemple) serait profitable pour la biodiversité (Virginie-Arielle Angers, communication personnelle). Hagan et Grove (1999) suggèrent de ne pas perturber les débris ligneux au sol situés dans les cours d'eau ou autres habitats propres aux reptiles et amphibiens.

Afin de diminuer les impacts sur le cortège floristique, Astrom et al., (2005) suggèrent d'avoir un nombre plus élevé d'arbres résiduels sur les sites de récolte, de créer et de protéger les gros résidus.

7.5 Arbres résiduels

Il est possible de mitiger, à un niveau acceptable, les blessures aux arbres résiduels en limitant la longueur des sections transportées par la débusqueuse (généralement moins de 5 mètres) et en façonnant partiellement les troncs en forêt. L'objectif étant d'éliminer les branches et les sections fortement courbées qui sont susceptibles de blesser les arbres en bordure des sentiers. De plus, les coupes par procédées de récolte de bois court (bois d'un diamètre de 9 cm et plus au fin bout) sont à envisager puisqu'elles diminuent considérablement les dommages fait aux arbres résiduels comparativement au procédé habituellement utilisé (arbre entier avec un diamètre au fin bout d'environ 20 cm) (François Guillemette et Steve Bédard, communication personnelle). Aussi, la diminution du nombre de passages de la

machinerie dans un sentier pourrait aider à diminuer les blessures faites aux arbres résiduels (François Guillemette et Steve Bédard , communication personnelle).

7.6 Indicateurs de suivi (monitorage)

Des indicateurs de contrôle de l'intervention (blessures aux arbres, compactage des sols, diamètre minimal de récolte) ainsi que des indicateurs de suivi à long terme (par exemple : fertilité des sols, volume en bois morts, régénération) pourraient être appliqués à ce type de récolte (François Guillemette, Steve Bédard et Louis Duchesne, communication personnelle). Les indicateurs pour la fertilité pourraient être les mêmes que ceux employés pour le monitoring des forêts subissant une coupe totale (Rock Ouimet, communication personnelle). Aussi, des volumes de bois mort sur pieds divisés en catégorie de décomposition et de diamètre (habitats résiduels) pourraient servir au suivi des récoltes (Virginie-Arielle Angers, communication personnelle). De plus, des indicateurs de biodiversité (organismes clés) seraient un bon moyen d'évaluer à long terme l'évolution de la richesse et de la densité faunique et floristique (Virginie-Arielle Angers, communication personnelle). Il est important de bien répertorier les compartiments exportés suite à la récolte (E. Thiffault, comm. pers.).

Conclusion

L'évaluation des impacts potentiels de la récolte de la biomasse indique que de nombreux facteurs font partie des enjeux entourant cette pratique. Le maintien d'une quantité suffisante des résidus est l'un des points les plus importants pour ce type de récolte afin d'assurer la prospérité des sites à long terme tant au niveau de la fertilité, de la biodiversité et de la régénération en essences forestières désirées. Même si la récolte de biomasse forestière semble avoir une perspective d'avenir économique prometteuse pour l'industrie forestière, elle devra toutefois être effectuée avec les mitigations nécessaires afin de préserver un milieu forestier.

Références

- Agence régionale de mise en valeur des forêts privées outaouaises. 2001.** *Problématique de la biodiversité et de la protection du milieu naturel*. PPMV. P 412-425.
- Åström, M., Dynesius, M., Hylander, K., Nilsson, C., 2005.** *Effects of slash harvest on bryophytes and vascular plants in southern boreal forest clear-cuts*. Journal of Applied Ecology 42, 1194–1202.
- Berg, A., Ehnström, B., Gustafsson, L., Hallingback, T., Jonsell, M., Weslien, J., 1994.** *Threatened plant, animal, and fungus species in Swedish forests: distribution and habitat associations*. Conservation Biology 8, 718–731.
- Berthet, J., 2006.** *Dictionnaire de biologie*. Éditions De Boeck Université. Bruxelles. 1034 p.
- Boyle, J.R., J.J. Phillips and A.R. Ek. 1973.** *Whole tree harvesting: nutrient budget evaluation*. Journal of Forestry 71: 760-762.
- Busing, R.T., Clebsch, E.E.C., White, P.S., 1992.** *Biomass and production of southern Appalachian cove forests re-examined*. Can. J. For. Res. Vol. 21. p 760 – 765.
- Cacot, E., Charnet, F., Eisner, N., Léon, P., ranger, J., Rantien, C., 2006.** *La récolte raisonnée des houppiers en forêt*. Angers, Ademe (collection « Connaître pour agir »), 36 p.
- CERFO (Centre Collégial de Transfert de Technologie en foresterie), 2009.** *Comment planifier la récolte de la biomasse résiduelle sans risquer d'affecter la pérennité des sites?* Technote, Québec, 4p.
- Chapman, J. W., Gower, S. T., 1991.** *Aboveground and canopy dynamics in sugar maple and red oak trees in southwestern Wisconsin*. Can. J. For. Res. Vol. 21. p 1533-1543.
- Couillard, L. et P. Grondin. 1986.** *La végétation des milieux humides du Québec*. Les Publications du Québec, Québec. 400 p.
- Cramer, O.P. (ed.) 1974.** *Environmental effects of forest residues management in the Pacific Northwest: a state-of-knowledge compendium*. USDA Forest Service, Gen. Tech. Rpt. PNW-GTR-24.
- Croke, J., Hairsine, P., Fogarty, P., 1999.** *Sediment transport, redistribution and storage on logged forest hillslopes in South-Eastern Australia*. Hydrological Processes, 13 (17) : 2705-2720. In: **Landmann, G., Gosselin, F., Bonhême, I. (coord.), 2009.** *Bio2, biomasse et biodiversité forestières. Augmentation de l'utilisation de la biomasse*

forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles. Paris, MEEDDM-Ecofor, 210 p.

Cromack, K., Cummins, K.W., 1986. *Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems*. Advances in Ecological Research 15, 133–302.

D'Avignon, H., Ouimet, R., 2008. *Effet de la durée de révolution sur le maintien à long terme de la fertilité des sols forestiers* – Revue de littérature. Gouvernement du Québec Ministère des Ressources naturelles et de la Faune Direction de la recherche forestière. 44 p.

Dahlgren, R. A., Driscoll, C. T., 1994. *The effects of whole-tree clear-cutting on soil processes at the Hubbard Brook Experimental Forest*. New Hampshire, USA. Plant and Soil 158: 239-262.

Deconchat, M., 2001. *Effets des techniques d'exploitation forestière sur l'état de surface du sol*. Ann. For. Sci. 58 (2001) 653–661.

Deconchat, M., Baiet, G., 2001. *Effets des perturbations du sol et de la mise en lumière occasionnées par l'exploitation forestière sur la flore à une échelle fine*. Annals of forest science, 58 (3) : 315-328.

Du Plessis, M. A., 1995. *The effects of fuelwood removal on the diversity of some cavity-using birds and mammals in south Africa*. Biological Conservation, 74 (2) : 77-82.

Dupont, J., Clair, T., A., Couture, S., Estabrook, R., Gagnon, C., Godfrey, P., J., Jeffries, D., S., Kahl, S., Kahn, H., Nelson, S., Peckenham, J., Pilgrim, W., Stacey, P., Taylor, D., Van Arsdale, A., 2002. *Charges critiques d'acidité et sensibilité de l'eau dans les états de la Nouvelle-Angleterre et les provinces du l'est du Canada*. 8p.

Ecke, F., Lofgren, O., Sorlin, D., 2002. *Population dynamics of small mammals in relation to forest age and structural habitat factors in northern Sweden*. Journal of Applied Ecology, 39 (5) : 781-792.

Federer, C., A., Hornbeck, J., W., Tritton, L., M., Martin, C., W., Pierce, R., S., 1989. *Long-term depletion of calcium and other nutrients in Eastern US Forests*. Environmental management Vol. 13, No. 5, pp. 593-601.

Freedman, B., 1991. *Nutrient removals during forest harvesting: implications for site fertility*. Dans Lemieux, G. et A. Lapointe. La perte de nutriments par la récolte des grumes : une absurdité. Univ. Laval, Fac. for. et géoma. Publ. No. 19. 14 p.

Frey, B. R., Lieffers, V. J., Munson, A. D., Blenis, P. V., 2003. *The influence of partial harvesting and forest floor disturbance on nutrient availability and understory vegetation in boreal mixedwoods*. Can. J. For. Res. 33: 1180-1188.

Gauquelin, X., Courbaud, B., (Coord.), 2006. *Guide des sylvicultures de montagne.* Alpes du Nord françaises. Grenoble, Cemagref, CRPF Rhône Alpes, ONF, 289 p.

Godefroid, S., Koedam, N., 2004. *Interspecific variation in soil compaction sensitivity among forest floor species.* Biological Conservation, 119 (2) : 207-217.

Gouvernement du Québec (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune), 2001. *Limiter la formation des ornières dans les parterres de coupe au moyen d'une approche de gestion par objectifs.* Info forêt. Numéro 70. 2 p.

Hacker, J.J. 2005. *Effects of logging residue removal on forest sites.* West Central Wisconsin Regional Planning Commission. Wisconsin. 29 p.

Hagan, J. M., Grove, S.L., 1999. *Coarse woody debris.* Journal of forestry. Volume 97, Number 1, 1 January 1999 , pp. 6-11(6).

Hanowski, J., Danz, N., Lind, J., Niemi, G., 2003. *Breeding bird response to riparian forest harvest and harvest equipment.* Forest Ecology and Management, 174 (1-3) : 315-328.

Harmon, M.E., Franklin, J.F., Swanson, F.J., Sollins, P., Gregory, S.V., Lattin, J.D., Anderson, N.H., Cline, S.P., Aumen, N.G., Sedell, J.R., Lienkaemper, G.W., Hornbeck, J.W. and W. Kropelin. 1982. *Nutrient removal and leaching from a whole-tree harvest of northern hardwoods.* Journal of Environmental Quality. 2: 309-316.

Institut canadien de recherche en génie forestier, 2007. *La prévention des dommages au sol durant les opérations de récolte.* Pointe-Claire. 16 p.

Kirby, J.M., Kirchhoff, G., 1990. *The compaction process and factors affecting soil compaction.* In: Hunter, M.N., Aull, C.J., Smith, G.D. (Eds.). Proceedings of Queensland Department of Primary Industries Soil Compaction Workshop, Queensland Department of Primary Industries, pp. 28-361.

Kozłowski, T. T., 1999. *Soil compaction and growth of woody plants.* Scandinavian Journal of Forest Research 14, 596-619.

Landmann, G., Gosselin, F., Bonhême, I. (coord.), 2009. *Bio2, biomasse et biodiversité forestières. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles.* Paris, MEEDDM-Ecofor, 210 p.

Le Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2008. *Charges critiques de dépôts acides dans les sols forestiers – Profil de la situation au Canada.* PN 1413. ISBN 978-1-896997-83-4 PDF.

Nykvist, N. and K. Rosen. 1985. *Effect of clear-felling and slash removal on the acidity of northern coniferous soils.* Forest Ecology and Management. 11: 157-169.

Machmer, M. 2002. *Effects of ecosystem restoration treatments on cavity-nesting birds, their habitat, and their insectivorous prey in fire-maintained forests of southeastern British Columbia.* USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-181. p 121-133.

Mahendrappa, M. K., Kingston, D. G. O., 1994. *Intensive harvest impacts on soil temperature and solution chemistry in the maritime region of Canada.* New Zealand Journal of Forest Science, 24 : 402-414.

Mann, L. K., Johnson, D. W., West, D. C., Cole, D. W., Hornbeck, J. W., Martin, C. W., Riekerk, H., Smith, C. T., SwankWANK, W. T., Tritton, L. M., Van Lear, D. H., 1988. *Effects of Whole-Tree and Stem-Only Clearcutting on Postharvest Hydrologic Losses, Nutrient Capital, and Regrowth.* Forest Science. Vol 34, No. 0, pp. 412-43.

Miller, R.E., R.L. Williamson and R.R. Silen. 1974. *IN: Environmental effects of forest residues management in the Pacific Northwest: a state-of-knowledge compendium.* O.P. Cramer, (ed.) USDA Forest Service, Gen. Tech. Rpt. PNW-GTR-24.

Ministère de l'Agriculture du Canada, 1992. *Le système canadien de classification des sols.* ISBN 0-660-92087-5. 170 p.

Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec, Côté, J.F., 2009. *Vers la valorisation de la biomasse forestière – plan d'action.* Gouvernement du Québec. ISBN 978-2-550-54984-0. 28 p.

Morin, H., Laprise, D., Simard, A., A., Amouch, S., 2008. « Régime des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans l'est de l'Amérique du Nord », dans Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., Bergeron, Y. (sous la direction de), Aménagement écosystémique en forêt boréale. Presse de l'université du Québec. Québec. p. 165-182.

Morrison, I. K., 1990. *Organic matter and mineral distribution in an old-growth Acer saccharum forest near the northern limit of its range.* Can. J. Res. Vol. 20. p 1332-1342.

Ouimet, R., 2005. *Cartographie des charges critiques d'acidité des forêts : deuxième approximation, rapport interne n°487.* Gouvernement du Québec Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. 66p.

Ouimet, R., Ducjesne, L., 2008. *Impact combiné des précipitations acides et du prélèvement de biomasse forestière sur le maintien à long terme de la fertilité des sols : évaluation et cartographie des charges critiques.* Gouvernement du Québec Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. 52 p.

Ouimet, R., Duchesne, L., 2009. *Dépôts atmosphériques dans les forêts au Québec.* Le naturaliste Canadien, volume 133, numéro 1. p 55-64.

Paré, D., P. Rochon and S. Brais. 2002. *Assessing the geochemical balance of managed boreal forests.* Ecological Indicators 1: 293–311.

Proe, M. F., Dutch, J., Griffiths, J., 1994. *Harvest residue effects on micro-climate, nutriiton, and early growth of Sitka spruce (Picea sitchensis) seedlings on a restock site.* New Zealand Journal of Forest Science, 24 : 390-401.

Raven, P., H., Evert, R., F., Eichhorn, S., E., 2000. *Biologie végétale.* De Boeck Université. Bruxelles. ISBN 2-7445-0102-6. 944p.

Rotaru, C., 1985. *Les phénomènes de tassement du sol forestier dus à l'exploitation mécanisée du bois.* R. F. F. XXXVII – 5. p 359-370.

Ruth, R.H. and A.S. Harris. 1975. *Forest residues in hemlock/spruce forests of the Pacific Northwest and Alaska: a state-of-knowledge review with recommendations for residue management.* USDA Forest Service. Gen. Tech. Rpt. PNW-GTR-39.

SCF 2010 : SCF - Service Canadien des Forêts (2008) Termes du glossaire. En ligne <http://scf.rncan.gc.ca/glossaire/>.

Shilo, A. L., 1966. *Decay and discoloration following logging wounds on northern hardwoods.* USDA For. Serv. Res. Pap. NE-47. NE For. Expr. Stn 43 p.

Smith, C.T. 1985. *Literature review and approaches to studying the impacts of forest harvesting and residue management practices on forest nutrient cycles.* Miscellaneous Report, Maine Agri. Expt. Station No. 305.

Swank, W. T., Vose, J. M., 1988. *Effects of cutting practices on microenvironment in relation to hardwood regeneration.* WV, 24-26 May 1988. Society of American Foresters Publication 88-03, West Virginia University Books. Morgantown, pp. 71-88.

Swedish National Board of Forestry, 2002. *Recommendations for the extraction of forest fuel and compensation fertilising.* Meddelande 3-2002. 29 p.

Thiffault, E., K.D. Hannam, S.A. Quideau, D. Paré, N. Bélanger, S.-W. Oh and A.D. Munson. 2008. *Chemical composition of forest floor and consequences for nutrient availability after wildfire and harvesting in the boreal forest.* Plant and Soil 308: 37–53.

Thiffault, E., Paré, D., Brais, S., Titus, B.D. 2010. *Intensive biomass removals and site productivity in Canada: A review of relevant issues.* The forestry chronicle. VOL. 86, No 1. pp. 36-42

Thiffault, E., Morissette, J., et coll., 2009. *Analyse de la sensibilité des sites pour le territoire de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'unité d'aménagement forestier de TEMBEC*, Service canadien des forêts, page 8.

Tritton, L. M., Hornbeck, J.W., 1980. *Dead wood in northern hardwood forest ecosystem*. Ph. D. dissertation. Yale Univ., New Haven. Connecticut.

Turbis, C., 2008. *La biomasse forestière : un rôle écologique à considérer*. Partenariat innovation forêt. Progrès forestier. 2 p.

Vaillancourt, M., A., De Grandpré, L., Gauthier, S., Leduc, A., Kneeshaw, D., Claveau, Y., Bergeron, Y., 2008. « *Comment les perturbations naturelles peuvent-elles constituer un guide pour l'aménagement forestier écosystémique?* », dans Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., Bergeron, Y. (sous la direction de), *Aménagement écosystémique en forêt boréale*. Presse de l'université du Québec. Québec. p. 41-59.

Verkerk, P. J., Lindner, M., Zanchi, G., Zudin, S., 2009. *Assessing impacts of intensified biomass removal on deadwood in European forests*. Elsevier. ECOIND-501. 9 p.

Villard, M. A., Guénette, J. S., 2005. *Les oiseaux forestiers montrent-ils la même sensibilité à l'exploitation forestières au l'échelles du peuplement et du paysage?* VertigO – La revue en sciences de l'environnement, Vol 6 no2. p1-5.

Welke, S., et Fyles, J., 2005. *Éléments de réflexion: Coup d'oeil sur la nutrition des forêts*. Réseau de gestion durable des forêts. Série de Note de Recherche No. 2. 6p.

Wyman, R. L., Jancola, J., 1992. *Degree and Scale of Terrestrial Acidification and Amphibian Community Structure*. Journal of Herpetology, Vol. 26, No. 4 (Dec., 1992), pp. 392-401.

Annexe**Tableau 4 : Mitigation et recommandations des impacts reliés à la récolte de biomasse**

Impacts	Recommandations / mitigations	Recommandé par
Sols -Fertilisation	La compensation en fertilisant devrait être fait avec de la cendre ou autres produits minéraux sur site non recouvert de neige ou de glace. Idéalement, cette cendre devrait provenir de la combustion du carburant de forêt pour sa qualité.	Swedish National Board of Forestry, 2002.
	Compenser l'azote enlevé.	
	Ne pas récolter toute la biomasse aérienne en laissant une part des rémanents au sol, et ce, à chaque récolte.	Cacot et al., 2006; François Guillemette; Miller et al. 1974; Hacker, 2005.
	Ramasser les rémanents une fois, voire deux, au maximum dans la vie du peuplement.	Cacot et al., 2006.
	Sur sol déficient en nutriments, faible en argile et en matière organique, récolter uniquement les résidus de gros calibres.	Ruth et Harris, (1975).
	Ne pas empiler les débris ligneux, mais de les disperser sur le site.	Hagan et Grove (1999).
	Ne pas récolter les souches.	
	Répertorier adéquatement la quantité de matériel organique qui a été récoltée ou laissée sur un site par type de compartiments.	Thiffault et al. (2010)
Sols -Métaux lourds	Établissement de valeurs maximales et minimales des métaux lourds en provenance de l'ajout de cendre.	Swedish National Board of Forestry, 2002.
Sols -Milieu humide	Prévoyez les opérations de récolte de façon à ce que les zones difficiles et peu connues se fassent le jour et réservez les zones plus faciles et mieux définies pour les quarts de nuit.	Institut canadien de recherche en génie forestier, 2007.
	Utilisez une pelle mécanique pour empiler des déchets de coupe, ce qui sera moins dommageable qu'avec un boteur.	Swedish National Board of Forestry, 2002.
	Utilisez des débardeurs ou porteurs munis de pneus à grande portance, de chenilles ou d'essieux tandems équipés de chenilles, ainsi que des flèches de chargement articulées ou des grappins pivotants afin de réduire la perturbation du sol à proximité des milieux humides.	Institut canadien de recherche en génie forestier, 2007.

Sols -Milieu humide	Empilez le bois ou les groupes de tiges loin des milieux humides.	Institut canadien de recherche en génie forestier, 2007.
	Surveillez les conditions de façon constante lors de l'opération d'équipement près des milieux humides et prenez des mesures préventives lorsque la résistance du sol diminue.	
Sols -Compactage	Déterminer l'état hydrique du sol en continu.	Landmann, G. et al, 2009.
	Limiter le passage d'engins aux seuls cloisonnements.	
Sols - Érosion	Maintenir un couvert végétal permanent.	Gauquelin et Courbaud, 2006.
	Stabiliser les voies de passages d'engins par une couverture de rémanents.	Landmann, G. et al, 2009.
	Ne pas laisser des sols nus en particulier sur pente supérieur à 15%.	
Sites sensibles	Classification des types de sol selon leur potentiel de risque pour la fertilité du sol suite à l'enlèvement de résidu.	United Kingdom Forestry Commission, 2008.
	Classification des types de sols selon la texture et du niveau trophique	Cacot et al., 2006.
	Identification des charges critiques.	Rock Ouimet
	Rallongeant la période de révolution ou en y rapportant sur le site les éléments minéraux qui ont été exportés.	
	Utiliser la liste de sites sensibles à la récolte de biomasse basée sur la fertilité à long terme des sols forestiers.	MRNF
	L'approche de caractérisation de sites basée la texture des sols.	David Paré et Evelyne Thiffault
Régénération en essences forestières désirées	En forêt feuillue sur sol très sensible à risque élevé, laisser sécher les rémanents sur coupe 4 à 6 mois avant leur récolte.	Cacot et al., 2006.
	Fertiliser systématiquement après récolte des rémanents avec une quantité égale à une fois et demie les quantités minérales exportées.	
	Poursuivre le développement de modèles de croissance des peuplements couplés à des tarifs de biomasse et de minéralomasse.	Landmann, G. et al, 2009.
Biodiversité	« Les forêts humides ainsi que les autres forêts ayant une valeur naturelle élevée, devraient être exemptées des opérations d'extraction si leurs valeurs naturelles sont affectées négativement ».	Swedish National Board of Forestry, 2002.
	« L'Extraction ne devrait pas inclure des espèces d'arbres qui sont moins communs ».	

Biodiversité	Une certaine proportion de cimes d'arbres et de branches de gros diamètres devraient être laissés sur le site.	Swedish National Board of Forestry, 2002.
	Porter une attention particulière aux bords de bois près des champs et des prairies, les sites de forêt brûlée et les arbres à feuilles caduques qui bordent des lacs et des cours d'eau.	
	On devrait éviter l'extraction inégale d'arbres à feuilles caduques dans les forêts mixtes.	
	Le bois mort de grande dimension de conifère et des arbres à feuilles caduques devrait être laissé sur le site lors de la récolte de carburant de forêt.	
	Laisser du bois mort en place, sous différentes formes et d'essences variées.	Landmann, G. et al, 2009.
	Éviter de rouler ou de faire passer des grumes sur les grosses pièces de bois.	
	Ne pas récolter la totalité des rémanents ou éviter de les brûler.	
	Conserver un vieil arbre par hectare.	
	Conserver quelques houppiers non démembrés.	
	Garder des sections de sites sans récolte de biomasse.	Virginie-Arielle Angers,
	Laisser des gros chicots sur place.	
	L'exclusion d'une récolte de biomasse lors de rotation.	