

**Évaluation des types écologiques forestiers  
sensibles à l'appauvrissement des sols  
en minéraux par la récolte de biomasse**

**Hors série**

Direction de la recherche forestière



**Évaluation des types écologiques forestiers  
sensibles à l'appauvrissement des sols  
en minéraux par la récolte de biomasse**

**Hors série**

par

Rock OUMET, ing.f., *Ph. D.*

et

Louis DUCHESNE, ing.f., M. Sc.

Gouvernement du Québec  
Ministère des Ressources naturelles  
et de la Faune  
Direction de la recherche forestière  
2009



## Résumé

Ce document fait suite au précédent rapport hors série sur l'évaluation des charges critiques déterminées à partir de l'impact combiné des précipitations acides et de la récolte de biomasse forestière sur le maintien à long terme de la fertilité des sols (OUMET et DUCHESNE 2008). Dans le présent rapport, nous rapportons des résultats plus détaillés du prélèvement des éléments minéraux par la végétation forestière selon le type de couvert et de l'excès d'acidité généré par la récolte de la biomasse forestière dans les écosystèmes forestiers. Nous y dressons aussi la liste des types écologiques sensibles ou possiblement sensibles à l'appauvrissement des sols en éléments minéraux par la récolte de la biomasse forestière selon la sous-région écologique.

Le taux de prélèvement des éléments minéraux est intimement lié au taux d'accroissement annuel moyen des types écologiques; l'accroissement annuel moyen varie, entre autres, selon la sous-région écologique et le milieu physique. La distribution de la minéralomasse (contenu en éléments minéraux de la biomasse) est liée aux différentes parties des arbres. La minéralomasse est surtout concentrée dans les branches et le feuillage, qui contiennent environ 60 % des éléments minéraux immobilisés en totalité dans les arbres par mètre cube de bois marchand.

La contribution à l'excès d'acidité généré par la récolte des troncs seulement est de 35 à 50 % sur au plus 7 % du territoire forestier au Québec. Celle par la récolte des arbres en entier est de 50 à 70 % sur au plus environ 30 % du territoire forestier.

Nous avons déterminé qu'un total de 30 types écologiques étaient sensibles à la récolte de biomasse forestière dans l'une ou l'autre des sous-régions écologiques du Québec; selon la sous-région examinée, certains de ces types écologiques devraient être exclus des programmes de récolte de biomasse et la récolte des troncs uniquement devrait être envisagée pour ces stations. De manière générale, l'évaluation montre que les sols forestiers organiques ombrotrophes et les sols minéraux très minces, pauvres, de texture grossière ou mal drainés sont qualifiés sensibles à la récolte de biomasse.

Nous avons identifié une quarantaine d'autres types écologiques possiblement sensibles dans l'une ou l'autre des sous-régions écologiques. Ceux-ci devraient faire l'objet d'un suivi afin d'en déterminer plus précisément la sensibilité à cette pratique.

## Table des matières

	page
<b>Résumé</b> .....	iii
<b>Liste des tableaux</b> .....	vi
<b>Liste des figures</b> .....	vii
<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre premier – Méthode</b> .....	3
<b>Chapitre deux – Résultats et discussion</b> .....	7
2.1 Biomasse et minéralomasse des types écologiques .....	7
2.2 Contribution de la récolte de la biomasse à l'acidification des sols forestiers .....	9
2.3 Types écologiques sensibles .....	12
2.4 Types écologiques possiblement sensibles .....	15
<b>Conclusion</b> .....	19
<b>Références bibliographiques</b> .....	21

## Liste des tableaux

	page
<b>Tableau 1.</b> Sources d'information utilisées pour l'évaluation la charge critique des types écologiques forestiers .....	5
<b>Tableau 2.</b> Relation entre le volume marchand sur pied et la biomasse anhydre des troncs marchands, des branches et totale épicée. Les troncs (portion marchande des tiges) comprennent l'écorce. Les branches comprennent ici le feuillage. Les équations sont du type : Biomasse ( $T_{\text{anhydre}} \text{ ha}^{-1}$ ) = intercept + [coefficient × volume marchand ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ )]. .....	11
<b>Tableau 3.</b> Liste des types écologiques qualifiés sensibles à la récolte de biomasse selon la région écologique. Cette liste a été dressée à partir des types écologiques dont l'excès d'acidité surpassait $200 \text{ éq ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ et pour lesquels la fréquence relative dans une sous-région écologique donnée était de 50 % et plus. ....	13
<b>Tableau 4.</b> Liste des types écologiques potentiellement sensibles à la récolte de biomasse selon la région écologique. Cette liste a été dressée à partir des types écologiques dont l'excès d'acidité surpassait $200 \text{ éq ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ et pour lesquels la fréquence relative dans une sous-région écologique donnée était de 0,5 à 49 %. ....	16

## Liste des figures

	page
<b>Figure 1.</b> Accroissement annuel moyen en volume marchand (AAM) des types écologiques feuillus, mélangés et résineux selon le domaine bioclimatique.....	8
<b>Figure 2.</b> Accroissement annuel moyen en volume marchand (AAM) des types écologiques feuillus, mélangés et résineux selon le milieu physique .....	8
<b>Figure 3.</b> Biomasse et minéralomasse en K, Ca et Mg des types écologiques résineux (R), mélangés (M) et feuillus (F) par mètre cube de bois marchand sur pied de forêt mure .....	10
<b>Figure 4.</b> Contribution de la récolte de biomasse à l'excès d'acidité de la charge critique des écosystèmes forestiers au Québec : A) récolte des troncs seulement; B) récolte par arbre entier .....	11



## Introduction

Au Québec, les forêts du domaine de l'État font croître environ 6,4 millions de tonnes de biomasse forestière annuellement (MRNF 2008a). Une partie de cette biomasse forestière pourrait être utilisée à des fins de développement énergétique ou industriel et permettrait ainsi de générer une activité économique importante. Le développement de cette filière à caractère énergétique est un maillon important de la stratégie de développement industriel du gouvernement du Québec orientée sur des produits à forte valeur ajoutée. Le remplacement d'énergies polluantes par une énergie propre, renouvelable et réductrice d'émissions de gaz à effet de serre est en effet à la base du plan d'action lié à la valorisation de la biomasse forestière (MRNF 2009). Pour assurer la gestion des attributions de biomasse forestière, le gouvernement du Québec a mis en place un programme d'octroi de permis autorisant la récolte de biomasse forestière des forêts du domaine de l'État pour une certaine période (MRNF 2008b). La biomasse forestière se définit comme des arbres ou parties d'arbre comptabilisés dans la possibilité forestière, mais exclus d'une attribution ou d'une réservation ainsi que les arbres, arbustes, cimes, branches et feuillages ne faisant pas partie du calcul de la possibilité forestière. Les souches et les racines sont exclues de cette définition dans le cadre du programme d'attribution de la biomasse forestière.

Cependant, au même titre que la récolte forestière, la récupération de la biomasse forestière doit assurer le maintien de la biodiversité et de la productivité des forêts ainsi que la protection des sols forestiers et de la qualité de l'eau des forêts du domaine de l'État. Le prélèvement des feuilles et des petites branches constitue une perte d'éléments nutritifs pour un écosystème forestier, et a comme conséquence probable de réduire la fertilité des sols. L'appauvrissement des sols à la suite de la récolte de biomasse est particulièrement évident sur les stations pauvres; des réductions de croissance y ont déjà été observées dès la deuxième rotation. En outre, la disponibilité des éléments minéraux nutritifs des horizons superficiels du sol est inférieure à la suite de la récolte des arbres entiers par rapport à la récolte des troncs seuls et ce, parfois jusqu'à 15 à 20 ans après récolte (GOULDING et STEVENS 1988, OLSSON *et al.* 1996, THIFFAULT *et al.* 2006). Le calcium (Ca) et le potassium (K) sont parmi les minéraux qui risquent le plus de faire défaut à court, moyen et long terme (GOULDING et STEVENS 1988, FEDERER *et al.* 1989,

DAHLGREN et DRISCOLL 1994, OLSSON *et al.* 1996, DUCHESNE et HOULE 2006, THIFFAULT *et al.* 2006, DUCHESNE et HOULE 2008).

De manière générale, les sols forestiers organiques ombrotrophes et les sols minéraux très minces ou pauvres et de texture grossière sont qualifiés sensibles à la récolte de biomasse (PARÉ *et al.* 2002, JEGLUM *et al.* 2003, MINNESOTA FOREST RESOURCE COUNCIL 2007, EVANS et PERSCHEL 2009). Ces qualifications sont principalement basées sur des exercices d'évaluation du bilan des éléments nutritifs. Au Québec, d'autres facteurs influencent de façon majeure ce bilan, en particulier les dépôts atmosphériques acides (OUMET et DUCHESNE 2009). Comme la littérature le rapporte, les dépôts acides sont en partie responsables de l'acidification et de l'appauvrissement des sols en éléments minéraux nutritifs, en particulier le calcium (TAMM et HALLBÄCKEN 1988, MORRISON 1992, LIECHTY *et al.* 1993, RUSTAD *et al.* 1993, JOHNSON 1994, LAWRENCE *et al.* 1999, ADAMS *et al.* 2000, BÉLANGER 2000, GBONDO *et al.* 2003, TOMLINSON 2003, WATMOUGH et DILLON 2003, PALMER *et al.* 2004, WATMOUGH et DILLON 2004, HOULE 2005, LAWRENCE *et al.* 2005, OUMET *et al.* 2008). Le Québec et l'Est du Canada sont particulièrement vulnérables aux précipitations acides (OUMET *et al.* 2006).

Dans le cadre du Plan d'action contre les pluies acides de la Conférence des gouverneurs des états de la Nouvelle-Angleterre et des premiers ministres des provinces de l'Est du Canada (NEG/ECP ENVIRONMENT TASK GROUP 1998), nous avons évalué la sensibilité des écosystèmes forestiers aux dépôts acides et à la récolte de biomasse dans la forêt méridionale commerciale du Québec (OUMET et DUCHESNE 2008).

Le présent rapport fait suite au précédent sur l'évaluation des charges critiques déterminées à partir de l'impact combiné des précipitations acides et de la récolte de biomasse forestière sur le maintien à long terme de la fertilité des sols (OUMET et DUCHESNE 2008). Il a comme objectif de répertorier les types écologiques, qualifiés sensibles à la récolte de biomasse, à partir de l'évaluation des charges critiques réalisée et décrite dans le rapport précédent.

## Chapitre premier

### Méthode

La démarche utilisée est celle du bilan d'acidité à court terme, communément appelée « charge critique » d'acidité à court terme. La charge critique est définie comme étant « une évaluation quantitative de la mesure de l'exposition à un ou plusieurs polluants – dans ce cas-ci l'acidité générée par les dépôts atmosphériques non marins de soufre, l'immobilisation des éléments minéraux nutritifs Ca, K, Mg dans la biomasse et l'alcalinité générée par les dépôts atmosphériques et l'altération chimique des sols en éléments minéraux nutritifs – en dessous de laquelle les éléments de l'environnement ne subissent aucun dommage significatif à court ou long terme, selon les connaissances actuelles » (UBA 2004). Elle est basée sur le bilan entrées-sorties de l'écosystème, soit l'équilibre géochimique, et le comportement chimique des sols. Elle ne prend pas en compte les flux d'azote. L'azote n'apparaît pas un élément limitatif à la récolte de biomasse forestière selon l'évaluation de sa charge critique (OUMET et DUCHESNE 2008). L'évaluation des charges critiques sert à discriminer les conditions inacceptables et celles acceptables d'un récepteur comme la forêt. De plus en plus, le concept de la charge critique est reconnu comme une démarche d'évaluation du risque (BARKMAN et ALVETEG 2001).

Les charges critiques en acidité des écosystèmes forestiers ont été calculées à l'aide du modèle *Simple Mass Balance* (SMB). Ce modèle est basé sur le bilan à l'échelle d'une rotation des flux d'éléments acidifiants et alcalinisants dans l'écosystème forestier. L'évaluation des charges critiques de la forêt cartographiée au Québec a été effectuée à l'échelle de la tesselle ( $n = 3,066,695$ ). La *tessellation* du territoire correspond à un échantillonnage de la carte écoforestière du MRNF par des « tesselles » (tuiles), chacune d'une superficie d'environ 14 ha, dont les caractéristiques correspondent au peuplement de la carte écoforestière retrouvé en son centre. Ainsi, au lieu de traiter les peuplements de la carte

écoforestière de manière individuelle, un échantillonnage de ces peuplements par *tessellation* permet de réduire la quantité d'information à traiter tout en conservant une représentativité du territoire. Les résultats sont rapportés à l'échelle de temps annuelle pour standardiser les valeurs entre les différents peuplements forestiers. Les principales bases de données employées pour évaluer les charges critiques dans cet article sont présentées au tableau 1. La procédure employée est expliquée en détails dans OUMET et DUCHESNE (2008).

Selon le MRNF, le type écologique constitue une synthèse de la classification qui décrit à la fois les caractéristiques physiques du milieu et les caractéristiques écologiques de la végétation potentielle (qui croît ou qui pourrait croître) eu égard à la composition, la structure et la dynamique. Nous avons évalué la biomasse et la minéralomasse (contenu en minéraux nutritifs) des types écologiques. Comme le taux de prélèvement des éléments nutritifs est lié au taux de croissance des types écologiques, nous avons comparé l'accroissement annuel moyen des types écologiques entre les sous-régions écologiques et le type de milieu physique. Nous avons aussi examiné la distribution de leur biomasse et de leur minéralomasse selon le type de couvert (feuillu, mélangé, résineux) dans les quatre parties des arbres susceptibles d'être récoltées (bois du tronc, écorce du tronc, branches et feuillage). Nous avons aussi déterminé la relation entre le volume marchand sur pied à l'hectare et la biomasse des troncs marchands, celle des branches et la biomasse totale épigée.

Nous avons également évalué, à l'échelle de la province, la contribution relative de la récolte de biomasse à l'excès d'acidité de la charge critique par rapport aux dépôts atmosphériques acides dans les écosystèmes forestiers.

L'erreur rattachée à l'évaluation de la charge critique est de plus de 200 éq ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (OUMET 2005). Ainsi, on peut qualifier avec une certaine certitude que les types écologiques dont l'excès d'acidité dépasse cette valeur sont sensibles. Les types écologiques qui correspondent au critère de  $\geq 200$  éq ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ont donc été déterminés par sous-région écologique ainsi que leur fréquence. Nous avons classé ces types écologiques sensibles à la récolte de biomasse lorsque leur fréquence relative était égale ou supérieure à 50 % dans la sous-région écologique. La fréquence relative de tesselles correspondant à ce critère a été calculée pour chaque type écologique selon la formule suivante :

$$\text{Fréquence relative} = \frac{\text{fréquence de tesselles dépassant la charge critique}}{\text{fréquence de tesselles}} \times 100$$

**Tableau 1. Sources d'information utilisées pour l'évaluation la charge critique des types écologiques forestiers**

Source	Référence
Dépôts atmosphériques humides, moyennes spatiales 1999-2002 pour le NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , SO <sub>4</sub> , Cl, Ca, Mg, K, et Na	SHAW <i>et al.</i> (2006)
Dépôts atmosphériques secs, moyennes spatiales 1999-2002 pour le NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> , Cl, Ca, Mg, K, et Na	SHAW <i>et al.</i> (2006)
Précipitations, évapotranspiration et température (moyennes annuelles 1961–1990 à partir de 410 stations météorologiques au Québec)	RÉGNIÈRE (1996)
Caractéristiques et accroissement annuel moyen des types écologiques par district écologique.	DIRECTION DES INVENTAIRES FORESTIERS, MRNF
Caractéristiques des types écologiques des tesselles SIFORT par district écologique.	NOËL (2002)
Inventaire forestier du troisième décennal (placettes-échantillons temporaires)	DIRECTION DES INVENTAIRES FORESTIERS, MRNF
Concentrations en éléments nutritifs des diverses composantes des arbres, par essence principale	NEG/ECP FOREST MAPPING GROUP (2001)
Biomasse des composantes (bois de tige, écorce, branches, feuillage) : équation allométrique par essence principale	LAMBERT <i>et al.</i> (2005)
Paramètres des sols des types écologiques par district écologique: profondeur du solum, pierrosité et texture (inventaire écologique 1986-2000)	DIRECTION DES INVENTAIRES FORESTIERS, MRNF
Sous-régions écologiques	SAUCIER <i>et al.</i> (1998)
Type de substrat (acide, intermédiaire, basique)	MRN (2001)



## Chapitre deux

### Résultats et discussion

#### 2.1 Biomasse et minéralomasse des types écologiques

Dans l'évaluation suivante, on assume que le volume de bois marchand sur pied qui est ou sera récolté correspond à l'accroissement annuel moyen multiplié par l'âge de révolution. Ce paramètre est donc d'une très grande importance car il dictera en partie le taux d'exportation de la minéralomasse. L'accroissement annuel moyen des types écologiques feuillus est de  $2,7 \pm 0,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Ceux des types écologiques mélangés et résineux sont respectivement plus faibles en moyenne de 16 et 44 % ( $P < 0,001$ ).

L'accroissement annuel moyen des types écologiques varie aussi selon la sous-région écologique ( $P < 0,001$ ) et le milieu physique ( $P = 0,084$ ). Dans un souci de simplification, nous présentons l'accroissement annuel moyen des couverts forestiers feuillus, mélangés et résineux selon le domaine bioclimatique (Figure 1). En général, l'accroissement annuel moyen diminue du domaine de l'érablière à caryer cordiforme à la pessière à mousses. Cette diminution s'accroît avec la proportion de résineux dans le type écologique (interaction sous-région écologique – couvert significative;  $P < 0,001$ ). L'accroissement annuel moyen des types écologiques feuillus ou mélangés n'est pas associé au milieu physique (Figure 2). Par contre, celui des types écologiques résineux est généralement plus faible sur les stations au dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage subhydrique (milieu physique n° 4), ainsi que sur les stations à sol organique ou à drainage hydrique (milieux physiques n°s 7, 8, 9) ( $P \leq 0,050$ ).

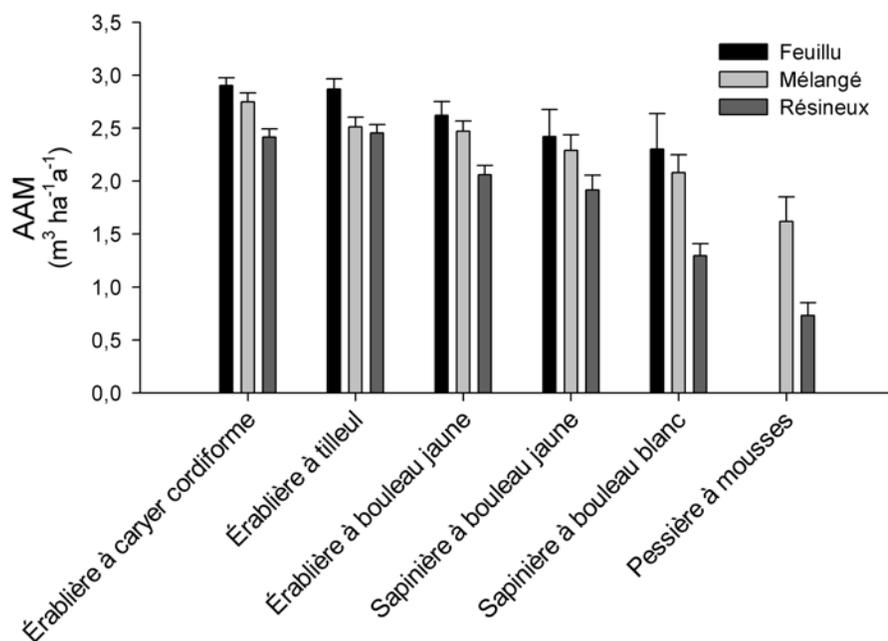


Figure 1. Accroissement annuel moyen en volume marchand (AAM) des types écologiques feuillus, mélangés et résineux selon le domaine bioclimatique.

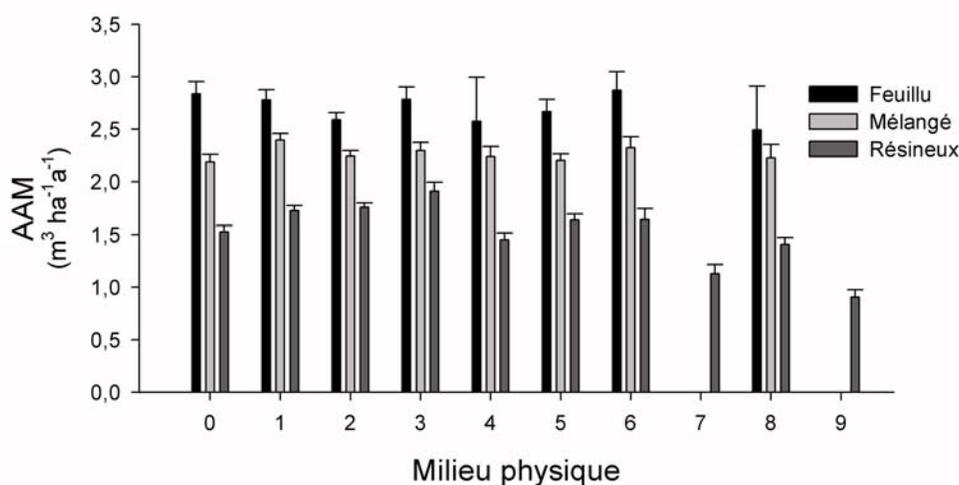


Figure 2. Accroissement annuel moyen en volume marchand (AAM) des types écologiques feuillus, mélangés et résineux selon le milieu physique (0 : station au dépôt très mince, de texture et de drainage variés; 1 : station au dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage xérique à mésique; 2 : station au dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique; 3 : station au dépôt de mince à épais, de texture fine et de drainage mésique; 4 : station au dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage subhydrique; 5 : station au dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage subhydrique; 6 : station au dépôt de mince à épais, de texture fine et de drainage subhydrique; 7 : station au dépôt minéral, de drainage hydrique, ombrotrophe; 8 : station au dépôt minéral ou organique, de drainage hydrique, minérotrophe; 9 : station au dépôt organique, de drainage hydrique, ombrotrophe).

Le bois de la partie marchande des arbres représente environ 68 % de la biomasse totale produite par mètre cube de bois marchand, que le couvert soit résineux, mélangé ou feuillu (Figure 3). Par contre, la minéralomasse en K, Ca et Mg est surtout concentrée dans les branches et le feuillage. Ces parties représentent respectivement 66, 57 et 61 % du K, Ca et du Mg immobilisés dans cette biomasse par mètre cube de bois marchand. Toujours en termes relatifs, la minéralomasse en K du feuillage des types écologiques résineux est supérieure à celle des deux autres types de couvert (49 contre 28 %,  $P < 0,001$ ). Ce patron de distribution de la minéralomasse dans les diverses parties des arbres est conforme aux études sur le sujet (FREEDMAN *et al.* 1982).

La relation entre le volume marchand sur pied à l'hectare et la biomasse des troncs marchands, celle des branches et de la biomasse totale épigée est linéaire tout type de couvert confondu (Tableau 2). Le type de couvert n'était pas une variable explicative suffisamment significative dans ce modèle. Connaissant le volume à récolter dans un secteur, il est possible d'estimer de façon simple la biomasse des troncs, des branches ou totale à partir de ces relations. Ces équations peuvent servir à valider les estimations de biomasse disponible ou de celle qui est récoltée lorsque le volume marchand est connu.

## **2.2 Contribution de la récolte de la biomasse à l'acidification des sols forestiers**

Les deux principaux facteurs qui contribuent à l'acidification des sols forestiers sont 1) l'immobilisation des minéraux alcalins dans la biomasse forestière récoltée et 2) l'acidité des dépôts atmosphériques. L'immobilisation des minéraux alcalins dans la biomasse forestière récoltée est évidemment fonction du mode de récolte. Deux scénarios de récolte ont été étudiés : 1) la récolte des troncs seulement (bois et écorce de la tige marchande) et 2) la récolte des arbres entiers (bois, écorce, et la totalité des branches et du feuillage).

L'évaluation de la charge critique des types écologiques indique globalement que seulement 13 % du territoire forestier cartographié a un excès d'acidité avec le scénario de récolte des troncs seulement; ce pourcentage atteint 39 % avec le scénario de récolte par arbre entier. Pour les territoires de la province qui se trouvent en excès d'acidité, la contribution de la récolte des troncs à l'excès d'acidité est de 35 à 50 % sur 55 % de ce territoire, soit sur environ 7 % du Québec (Figure 4). Celle de la récolte des arbres en entier à cet excès est de 50 à 70 % sur 79 % de ce territoire, soit sur environ 30 % du Québec.

Ces chiffres indiquent que la récolte de la biomasse forestière contribuerait à appauvrir les sols sur une partie non négligeable du territoire au Québec. En Suède, la contribution de la récolte forestière au surplus d'acidité de l'écosystème forestier est relativement plus importante qu'au Québec. L'évaluation a montré que la contribution de la récolte des troncs à l'excès d'acidité est de 40 à 60 % sur 58 % du territoire forestier suédois, alors que la contribution de la récolte des arbres en entier est de 50 à 80 % sur 46 % du territoire (NATURVÅRDSVERKET 2007).

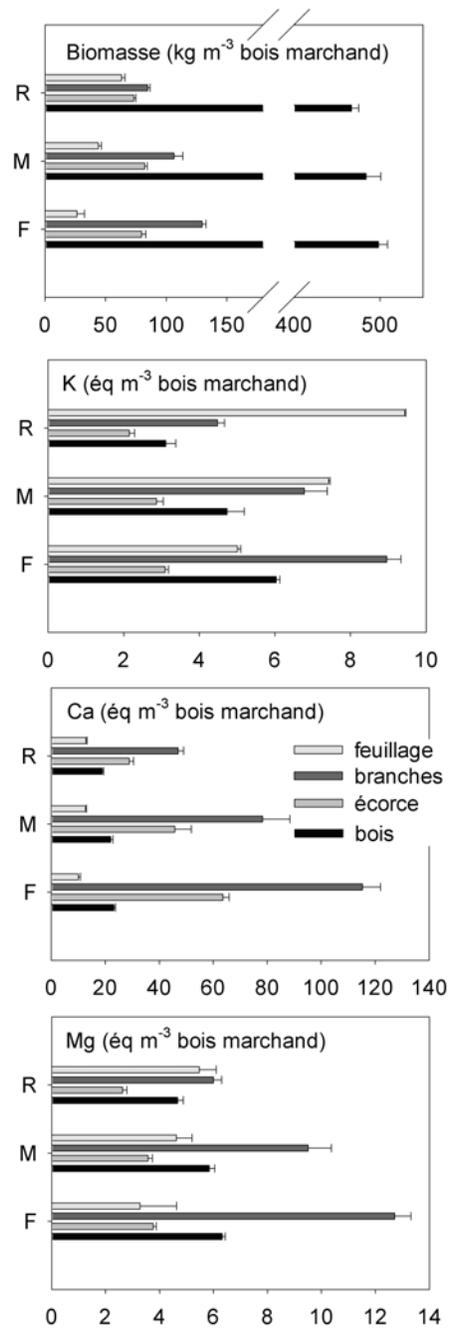


Figure 3. Biomasse et minéralomasse en K, Ca et Mg des types écologiques résineux (R), mélangés (M) et feuillus (F) par mètre cube de bois marchand sur pied de forêt mure.

**Tableau 2. Relation entre le volume marchand sur pied et la biomasse anhydre des troncs marchands, des branches et totale épigée. Les troncs (portion marchande des tiges) comprennent l'écorce. Les branches comprennent ici le feuillage. Les équations sont du type : Biomasse ( $T_{\text{anhydre}} \text{ ha}^{-1}$ ) = intercept + [coefficient  $\times$  volume marchand ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ )].**

Type de biomasse ( $T \text{ ha}^{-1}$ )	Intercept	Coefficient	Erreur ( <i>RMSE</i> )	$r^2$
Troncs	9,06	0,50	10,46	0,93
Branches	3,95	0,12	4,39	0,80
Totale	13,01	0,62	13,93	0,92

Exemple de calcul : L'inventaire d'exploitation dans un secteur de coupe indique que le volume de tiges marchandes commerciales est de  $180 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . La biomasse anhydre de branches (y compris celle du feuillage) est estimée à  $3,95 + 0,12 \times 180 = 34,6 \pm 8,6 T_{\text{anh.}} \text{ ha}^{-1}$  dans 95 % des cas (l'erreur se calcule de cette façon :  $\pm 1,96 \times \text{erreur du modèle} = \pm 1,96 \times 4,39 = \pm 8,6$ ).

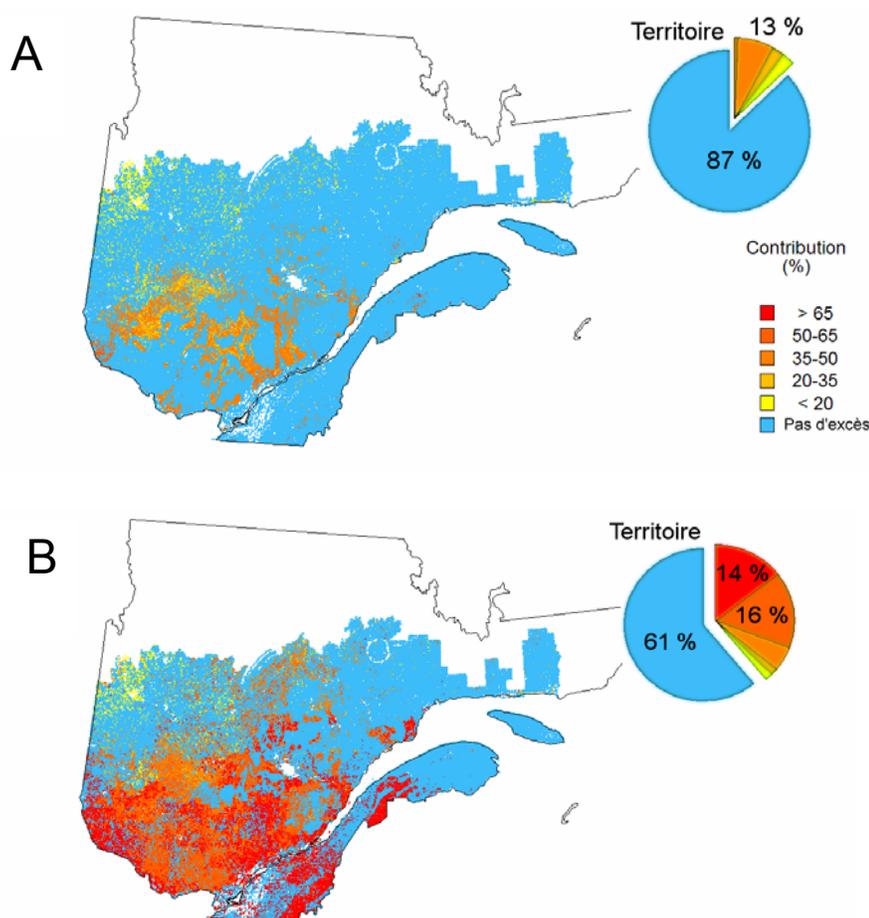


Figure 4. Contribution de la récolte de biomasse à l'excès d'acidité de la charge critique des écosystèmes forestiers au Québec : A) récolte des troncs seulement; B) récolte par arbre entier.

### 2.3 Types écologiques sensibles

L'excès d'acidité de  $200 \text{ éq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  résultant du scénario de récolte des troncs seulement est lié à celui du scénario de récolte par arbre entier dans un rapport récolte tronc/arbre égal à  $0,880 \pm 0,001$  ( $r^2 = 0,98$ ,  $\sigma = 5,15$ ). Ainsi, la différence entre les deux modes de récolte est faible lorsque l'excès d'acidité dépasse ce seuil de  $200 \text{ éq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Au total, 30 types écologiques sont qualifiés de sensibles. La liste de ces types écologiques est présentée par sous-région écologique au tableau 3. On remarque que ces derniers sont situés dans :

- 1) des stations au dépôt très mince (FC10, FE30, FE3H, FE50, FE60, MS20, RT10), ce qui limite leurs réserves de minéraux nutritifs en raison de la faible épaisseur du sol;
- 2) des stations au dépôt mince à épais et de texture grossière ou très grossière (FE31, MJ11, MJ21, MS21, RS11, RT11); les sols à texture grossière sont généralement peu pourvus de minéraux nutritifs et sujets à l'acidification;
- 3) des stations dont le drainage est mauvais (FE35, FO14, FO18, MF14, MJ26, RC38, RE24, RP14, RS14), ce qui limite la capacité des racines à explorer le sol en profondeur, donc à faible réserve en minéraux nutritifs disponibles;
- 4) des stations sur sol organique ombrotrophe (RE39, RS39) et ce, dans presque toutes les régions du Québec.

Les types écologiques précités correspondent généralement aux stations qualifiées sensibles à la récolte de biomasse, ici comme ailleurs dans d'autres juridictions (PARÉ *et al.* 2002, JEGLUM *et al.* 2003, MINNESOTA FOREST RESOURCE COUNCIL 2007, ADEME 2008, EVANS et PERSCHEL 2009). Ils ne sont cependant pas tous sensibles dans toutes les sous-régions écologiques du Québec où ils peuvent être rencontrés, mises à part les stations sur sol organique. Cette évaluation à partir de la charge critique indique que des types écologiques sensibles d'une région désignée ne le sont pas nécessairement dans une autre. Ces situations s'expliquent par des facteurs indépendants de ceux qui ont servi à classer les peuplements forestiers en types écologiques. Ces facteurs indépendants sont : 1) la variabilité des dépôts atmosphériques à l'échelle de la province (OUMET et DUCHESNE 2009), 2) la variabilité dans la composition minéralogique des sols à l'échelle régionale, ainsi que 3) la variabilité de l'accroissement annuel moyen d'un même type écologique dans les différentes sous-régions écologiques où il se trouve.

Les résultats indiquent également que des types écologiques de certaines sous-régions écologiques sont déclarés sensibles, même s'ils semblent *a priori* sur des stations que l'on pourrait qualifier d'adéquates pour la récolte de biomasse forestière, par exemple : les stations situées sur des dépôts minces à épais, de texture moyenne et de drainage mésique de certaines sous-régions écologiques (FE22, FE42, FE3H, MS12, RT12). Cela s'explique par la contribution très grande des dépôts acides à l'acidification dans ces régions (OUMET et DUCHESNE 2008).

**Tableau 3. Liste des types écologiques qualifiés sensibles à la récolte de biomasse selon la région écologique. Cette liste a été dressée à partir des types écologiques dont l'excès d'acidité surpassait 200 éq ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> et pour lesquels la fréquence relative dans une sous-région écologique donnée était de 50 % et plus.**

Type de végétation potentielle	Type écologique	Sous-région écologique
Chênaie rouge sur station à dépôt très mince	FC10	2aT
Érablière à tilleul sur station à dépôt de mince à épais	FE22	4cT
Érablière à bouleau jaune	FE30	2bT 4cT
	FE31	3aS 4bT 4cM 4dT
	FE35	4cM
	FE3H	4dM
Érablière à bouleau jaune et hêtre	FE42	2bT
Érablière à ostryer sur station à dépôt très mince	FE50	2bT
Érablière à chêne rouge sur station à dépôt très mince	FE60	2aT 3cM
Ormaie à frêne noir	FO14	1aT
	FO18	3aM 3bM
Frênaie noire à sapin	MF14	1aT 2aT 3cT
Bétulaie jaune à sapin et érable à sucre	MJ11	3cS 3cT 4aT
	MJ14	3cT
Bétulaie jaune à sapin	MJ21	4dM
	MJ26	4cT
Sapinière à bouleau jaune	MS11	3cM 4bT
	MS12	3aM
Sapinière à bouleau blanc	MS20	3cM
	MS21	3aM 6dT
Cédrière tourbeuse à sapin	RC38	3bM
Pessièrre noire à mousses ou éricacées	RE24	3cS
Pessièrre noire à sphaignes sur station au dépôt organique, de drainage hydrique, ombrotrophe	RE39	1aT 2aT 2bT 2cT 3aM 3aS 3aT 3bM 3bT 3cM 3cS 3cT 3dM 3dT 4aT 4bM 4bS 4bT 4cM 4cT 4dM 4dT 4eT 4fS 4fT 4gT 4hT 5aT 5bT 5cM 5cS 5cT 5dM 5dT 5eS 5eT 5fS 5fT 5gT 5hT 5jT 6aT 6bT 6cT 6dT 6eT 6fT 6gT 6hT 6iS 6iT 6jS 6jT 6kT 6iT 6mT 6nT 6pT

**Tableau 3 (suite et fin). Liste des types écologiques qualifiés sensibles à la récolte de biomasse selon la région écologique. Cette liste a été dressée à partir des types écologiques dont l'excès d'acidité surpassait 200 éq ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> et pour lesquels la fréquence relative dans une sous-région écologique donnée était de 50 % et plus.**

Type de végétation potentielle	Type écologique	Sous-région écologique
Pinède blanche ou rouge	RP14	2aT
Sapinière à thuya	RS11	3cM
	RS14	3cT
Sapinière à épinette noire et sphaignes sur station au dépôt organique, de drainage hydrique, ombrotrophe	RS39	1aT 2aT 2bT 2cT 3aM 3aS 3aT 3bM 3bT 3cM 3cS 3cT 3dM 3dT 4aT 4bM 4bS 4bT 4cM 4cT 4dM 4dT 4eT 4gT 4hT 5aT 5bT 5cM 5cS 5cT 5dM 5dT 5eT 5fS 5fT 5gT 5hT 5iS 5iT 5jT 6aT 6cT 6dT 6eT 6fT 6gT 6hT 6iS 6iT 6jS 6jT 6kT 6iT 6mT 6nT 6pT
Prucheraie	RT10	3cS
	RT11	3cM
	RT12	3cS

NOTE : Les trois premiers caractères des acronymes des types écologiques correspondent à la végétation potentielle (climacique). Le quatrième caractère correspond aux caractéristiques du milieu physique :

- ... 0 : dépôt très mince.
- ... 1 : dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage xérique à mésique.
- ... 2 : dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique.
- ... 3 : dépôt de mince à épais, de texture fine et de drainage xérique à mésique.
- ... 4 : dépôt de mince à épais, de texture grossière et de drainage subhydrique.
- ... 5 : dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage subhydrique.
- ... 6 : dépôt de mince à épais, de texture fine et de drainage subhydrique.
- ... 7 : dépôt minéral, de drainage subhydrique, ombrotrophe.
- ... 8 : dépôt minéral ou organique, de drainage hydrique, minérotrophe.
- ... 9 : dépôt organique, de drainage hydrique, ombrotrophe.
- ... H : situation topographique en haut de pente.

## 2.4 Types écologiques possiblement sensibles

Les types écologiques qui avaient un excès d'acidité  $\geq 200 \text{ éq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , mais dont la fréquence relative était inférieure à 50 % sont présentés au tableau 4. Au total, 62 types écologiques ont été répertoriés. Cette liste comprend des types écologiques qui, dans certaines sous-régions écologiques, sont qualifiés de sensibles pour la récolte de biomasse forestière dans d'autres sous-régions écologiques. Ce sont donc les mêmes types écologiques que ceux du tableau 3, mais dans d'autres sous-régions écologiques, la plupart du temps voisines de celles déjà identifiées. De plus, quelques nouveaux types écologiques sur sol mince (FE10, FE20, MJ10, MJ20, RP10, RS10, RS20), sur sol sec à texture grossière (FE21, FE51, FE61, RB11, RP11, RS21, RS51), sur sol mal drainé (FE25, MF15, MF18, MJ15, MJ24, MJ25, MJ28, MS14, MS25, MS26, RS15, RS18, RS24, RS54) et sur sol à texture moyenne ou fine (FE12, FE13, FE32, FE62, MJ12, MJ22, RB12, RS12, RS22, RS42) font partie de cette liste.

Dans le cadre de son programme 2009-2013 d'attribution de la biomasse forestière sur les terres publiques (MRNF 2008b), le MRNF a exclu de certains territoires certains types écologiques répertoriés au tableau 3. Le suivi environnemental du programme prévoit préciser davantage les stations sensibles à la récolte de biomasse forestière. Les types écologiques des tableaux 2 et 3 fournissent une base pour planifier ce suivi environnemental à l'échelle de la province.

**Tableau 4. Liste des types écologiques possiblement sensibles à la récolte de biomasse selon la région écologique. Cette liste a été dressée à partir des types écologiques dont l'excès d'acidité surpassait 200 éq ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> et pour lesquels la fréquence relative dans une sous-région écologique donnée était de 0,5 à 49 %.**

Type de végétation potentielle	Type écologique	Sous-région écologique
Chênaie rouge	FC10	1aT 3aM
	FC12	1aT 2aT 3aM
Érablière à caryer cordiforme	FE10	1aT
	FE12	3aM
	FE13	3aM
Érablière à tilleul	FE20	1aT 2aT 2bT 3aM 3cT
	FE21	1aT 1aT 2aT 2cT 3aM 3dM
	FE22	2aT 2bT 3aM 3cM 3cT
	FE25	1aT 2aT 2bT 2cT 3aM 3bM 3cM 3cT
Érablière à bouleau jaune	FE31	2bT 2cT 3cM 3cS 3cT 3dM 4aT 4cT 4dM
	FE32	2bT 3bM 3cM 3cS 3cT 4bM 4bT 4cM 4cT 4dT 4eT
	FE34	3aT
	FE35	3cM 3cS 3cT 4cT 4dM
	FE3H	2bT 3bM 3cS 4bM 4cT
Érablière à ostryer	FE50	1aT 2aT 3aM 3bM
	FE51	1aT
	FE52	2aT 2bT 3aM 3bM 3cM 3cT
Érablière à chêne rouge	FE60	1aT 3aM
	FE61	2aT
	FE62	2aT 2bT 3aM 3cM
Ormaie à frêne noir	FO18	3bT 4eT 4fS
Frênaie noire à sapin	MF14	2cT 3aM 3bM 3bT
	MF15	2aT 3aM 3bM 3bT 3cM 3cT 4eT
	MF18	2aT 2aT 3bM 3bT 4eT
Bétulaie jaune à sapin et érable à sucre	MJ10	1aT 2aT 2bT 3cS 3cT 4bM 4cT
	MJ11	1aT 2aT 2bT 3aM 3aS 3aT 3bM 3cM 4bM 4bT 4cM 4cT 4dM
	MJ12	1aT 2aT 2bT 3cM 3cS 3cT 4bM 4cM
	MJ14	1aT 2aT 2cT 3aM 3bT 3cM 3dM
	MJ15	2aT 3cM 3cS 3cT 4bM 4cT
Bétulaie jaune à sapin	MJ20	2bT 3bM 3cS 3cT 5bT
	MJ21	2bT 3bM 3bT 3cM 3cS 4bM 4bS
	MJ22	3cM 3cS
	MJ24	1aT 2bT 2cT 3bM 3bT 3cM 3cS 3cT 4bM 4bS
	MJ25	2aT 3bT 3cM 3cS
	MJ28	3cM 3cS 3cT
Sapinière à bouleau jaune	MS12	3cM
	MS14	4dM

**Tableau 4 (suite et fin). Liste des types écologiques possiblement sensibles à la récolte de biomasse selon la région écologique. Cette liste a été dressée à partir des types écologiques dont l'excès d'acidité surpassait 200 éq ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> et pour lesquels la fréquence relative dans une sous-région écologique donnée était de 0,5 à 49 %.**

Type de végétation potentielle	Type écologique	Sous-région écologique
Sapinière à bouleau blanc	MS20	3cS 3cT
	MS21	1aT 3bM 3bT 3cS 3cT 4aT 4bM 4bS 4bT 4cT 4dM 4dT 5aT 5bT 5dM 5eS 6cT
	MS25	4eT
	MS26	4cT
Pessière blanche ou cédrière issue d'agriculture	RB11	2aT 3bM
	RB12	2aT 4dT
Cédrière tourbeuse à sapin	RC38	3bT
Pessière noire à sphaignes sur station au dépôt organique, de drainage hydrique, ombrotrophe	RE39	6jS 6IT 6qT 6rT
Pinède blanche ou rouge	RP10	2aT
	RP11	2aT 3aM
Sapinière à thuya	RS10	4bM
	RS11	2bT 3bM
	RS12	2bT
	RS14	2aT 3aM 3bM
	RS15	2aT 3cS
	RS18	3bM
Sapinière à épinette noire	RS20	3cS
	RS21	3bT
	RS22	2bT 3cT
	RS24	3cT
Sapinière à épinette noire et sphaignes sur station au dépôt organique, de drainage hydrique, ombrotrophe	RS39	6rT
Sapinière à épinette noire montagnarde	RS42	4fM
Sapinière à épinette rouge	RS51	4dM
	RS54	3bM 3cS
Prucheraie	RT10	3cT
	RT12	1aT 3cM 3cT

NOTE : Les trois premiers caractères des acronymes des types écologiques correspondent à la végétation potentielle (climacique). Le quatrième caractère correspond aux caractéristiques du milieu physique comme défini au Tableau 2.



## Conclusion

L'évaluation des charges critiques et de leur dépassement indique qu'un total de 30 types écologiques répartis dans diverses sous-régions écologiques du Québec méridional sont qualifiés sensibles à la récolte de biomasse forestière, si l'on prend en compte l'appauvrissement du sol en éléments minéraux (Ca, Mg, K). Une quarantaine de types écologiques additionnels sont jugés possiblement sensibles et méritent d'être investigués dans le cadre du suivi environnemental du programme d'attribution de la biomasse forestière du MRNF. La plupart des types écologiques qualifiés de sensibles à la récolte de biomasse forestière correspondent aux caractéristiques de stations déjà reconnues pour leur vulnérabilité à la récolte de biomasse (sols minces, à texture grossière, mal drainés, organiques). Par contre, d'autres types écologiques que ceux généralement reconnus ont aussi été déclarés sensibles, en raison de la charge d'acidité qu'ils reçoivent déjà par les précipitations acides.

La présente évaluation des types écologiques sensibles est basée sur le bilan entrées-sorties de l'écosystème, soit l'équilibre géochimique, et le comportement chimique des sols. Bien que l'analyse permette d'affirmer que le risque de perte de fertilité par la récolte de biomasse existe sur ces territoires, elle ne permet pas d'estimer dans combien de temps les sols s'appauvriraient au point de diminuer la qualité et la productivité de la station. Pour quantifier si l'importance de cette acidification met en péril la fertilité des stations à court ou seulement à plus long terme, il est nécessaire d'obtenir des données locales plus précises sur les propriétés physico-chimiques des sols forestiers (par ex. : profondeur, texture, minéralogie). D'autres caractéristiques des types écologiques (par ex. : le bilan en azote et en carbone, la sensibilité de la faune et de la flore, la qualité de l'eau) méritent autant l'attention dans le cadre de l'intensification de la récolte de la biomasse forestière sur les terres publiques et privées. Les impacts écologiques d'une telle pratique méritent également d'être mieux colligés étant donné l'importance des dépôts atmosphériques acides dans certaines régions du Québec.



## Références bibliographiques

- ADAMS, M.B., J.A. BURGER, A.B. JENKINS et L. ZELAZNY, 2000. *Impact of harvesting and atmospheric pollution on nutrient depletion of eastern US hardwood forests*. Forest Ecology and Management 138 : 301-319.
- ADEME, 2008. *La récolte raisonnée des rémanents en forêt*. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, Angers, France. 20 p.
- BARKMAN, A. et M. ALVETEG, 2001. *Effects of data uncertainty in the Swedish critical load assessment for forest soils*. Water Air and Soil Pollution 125 : 133-156.
- BÉLANGER, N., 2000. *Investigating the long-term influence of atmospheric acid deposition and forest disturbance on soil chemistry and cation nutrient supplies in a forested ecosystem of southern Quebec*. Ph. D. thesis, McGill University, Montréal.
- DAHLGREN, R.A. et C.T. DRISCOLL, 1994. *The effects of whole-tree clear-cutting on soil processes at the Hubbard Brook Experiment Forest, New Hampshire, USA*. Plant and Soil 158 : 239-262.
- DUCHESNE, L. et D. HOULE, 2008. *Impact of nutrient removal through harvesting on the sustainability of the boreal forest*. Ecological Applications 18 : 1642-1651.
- DUCHESNE, L. et D. HOULE, 2006. *Basic cation cycling in a pristine watershed of the Canadian boreal forest*. Biogeochemistry 78 : 195-216.
- EVANS, A.M. et R.T. PERSCHEL, 2009. *An assessment of biomass harvesting guidelines*. Forest Guild, Santa Fe, NM. 20 p.

- FEDERER, C.A., J.W. HORNBECK, L.M. TRITTON, C.W. MARTIN et R.S. PIERCE, 1989. *Long-term depletion of calcium and other nutrients in eastern US forests*. Environmental Management 13 : 593-601.
- FREEDMAN, B., P.N. DUINKER, H. BARCLAY, R. MORASH et U. PRAGER, 1982. *Forest biomass and nutrient studies in central Nova Scotia*. Can. For. Serv., Marit. For. Res. Cent. Rapport d'information M-X-134. 126 p.
- GBONDO, TUGBAWA, S.S. et C.T. DRISCOLL, 2003. *Factors controlling long-term changes in soil pools of exchangeable basic cations and stream acid neutralizing capacity in a northern hardwood forest ecosystem*. Biogeochemistry 63 : 161-185.
- GOULDING, K.W.T. et P.A. STEVENS, 1988. *Potassium reserves in a forested, acid upland soil and the effect on them of clear-felling versus whole-tree harvesting*. Soil Use and Management 4 : 45-51.
- HOULE, D., 2005. *Chapter 5. Effects on forests and soils*. Dans 2004 Scientific Assessment of Acid Deposition, Downsview, ON, Canada. Edité par Environment Canada Science Assessment and Integration Branch. p. 201-240.
- JEGLUM, J.K., H.M. KERSHAW, D.M. MORRIS et D.A. CAMERON, 2003. *Best forestry practices: a guide for the boreal forest in Ontario*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Great Lakes Forestry Centre, Sault Ste. Marie ON, Ontario Ministry of Natural Resources. Fo124-1/2003E. 110 p.
- JOHNSON, A.H., 1994. *Acid rain and soils of the Adirondacks. II. Rates of soil acidification in a montane spruce-fir forest at Whiteface Mountain, New York*. Revue canadienne de recherche forestière 24 : 663-669.
- LAMBERT, M.C., C.H. UNG et F. RAULIER, 2005. *Canadian national tree aboveground biomass equations*. Revue canadienne de recherche forestière 35 : 1996-2018.
- LAWRENCE, G.B., A.G. LAPENIS, D. BERGGREN, B.F. APARIN, K.T. SMITH, W.C. SHORTLE, S.E. BAILEY, D.L. VARLYGUIN et B. BABIKOV, 2005. *Climate dependency of tree growth suppressed by acid deposition effects on soils in Northwest Russia*. Environmental Science and Technology 39 : 2004-2010.
- LAWRENCE, G.B., M.B. DAVID, G.M. LOVETT, P.S. MURDOCH, D.A. BURNS, J.L. STODDARD, B.P. BALDIGO, J.H. PORTER et A.W. THOMPSON, 1999. *Soil calcium status and the response of stream chemistry to changing acidic deposition rates*. Ecological Applications 9 : 1059-1072.

- LIECHTY, H.O., G.D. MROZ et D.D. REED, 1993. *Cation and anion fluxes in northern hardwood throughfall along an acidic deposition gradient*. Revue canadienne de recherche forestière 23 : 457-467.
- MINNESOTA FOREST RESOURCE COUNCIL, 2007. *Biomass harvesting on forest management sites in Minnesota - Draft*. Biomass Harvesting Guideline Development Committee, Minnesota Forest Resources Council. 28 p.
- MORRISON, I.K., N.W. FOSTER et J.A. NICOLSON, 1992. *Influence of acid deposition on element cycling in mature sugar maple forest, Algoma, Canada*. Water Air and Soil Pollution 61 : 243-252.
- MRN, 2001. *Carte géologique du Québec*. Québec, Ministère des Ressources naturelles. 1 carte numérique.
- MRNF 2009. *Vers la valorisation de la biomasse forestière. Un plan d'action*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. Code de diffusion : 2009-3000. 28 p.
- MRNF 2008a. *La forêt, pour construire le Québec de demain*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction des communications. 73 p.
- MRNF 2008b. *Programme relatif à l'octroi d'un droit pour la récolte de biomasse forestière. Guide d'information sur les considérations environnementales*. Document d'accompagnement de l'appel d'offre. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune. 8 p.
- NATURVÅRDSVERKET, 2007. *Bara naturlig försurning. Underlagsrapport till fördjupad utvärdering av miljömålsarbetet*. Naturvårdsverket. Rapport 5766. 118 p.
- NEG/ECP ENVIRONMENT TASK GROUP 1998. *Acid Rain Action Plan 1998*. Préparé par The Committee on the Environment of The Conference of New England Governors and Eastern Canadian Premiers. 12 p.
- NEG/ECP FOREST MAPPING GROUP 2001. *Protocol for assessment and mapping of forest sensitivity to atmospheric S and N deposition*. Groupe de travail sur la cartographie forestière. Conférence des gouverneurs de la Nouvelle-Angleterre et des premiers ministres de l'Est du Canada, Halifax, Canada.

- OLSSON, B.A., J. BENGTSSON et H. LUNDKVIST, 1996. *Effects of different forest harvest intensities on the pools of exchangeable cations in coniferous forest soils*. Forest Ecology and Management 84 : 135-147.
- OUMET, R., 2005. *Cartographie des charges critiques d'acidité des forêts : deuxième approximation*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 487. 48 p.
- OUMET, R. et L. DUCHESNE, 2009. *Dépôts atmosphériques dans les forêts au Québec : retombées actuelles en forêt et tendances au cours des 20 à 30 dernières années*. Naturaliste Canadien 133 : 56-64.
- OUMET, R. et L. DUCHESNE, 2008. *Impact combiné des précipitations acides et de la récolte de biomasse forestière sur le maintien à long terme de la fertilité des sols : évaluation et cartographie des charges critiques*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Rapport hors série. 38 p. Disponible à l'adresse ci-dessous : [www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Ouimet-Rock/Rapport-hors-serie-2008b.pdf](http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Ouimet-Rock/Rapport-hors-serie-2008b.pdf).
- OUMET, R., J.D. MOORE, et L. DUCHESNE, 2008. *Effects of experimental acidification and alkalization on soil and growth and health of Acer saccharum Marsh*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171 : 858-871.
- OUMET, R., P.A. ARP, S.A. WATMOUGH, J. AHERNE et I. DEMERCHANT, 2006. *Determination and mapping critical loads of acidity and exceedances for upland forest soils in Eastern Canada*. Water Air and Soil Pollution 172 : 57-66.
- PALMER, S.M., C.T. DRISCOLL et C.E. JOHNSON, 2004. *Long-term trends in soil solution and stream water chemistry at the Hubbard Brook Experimental Forest: relationship with landscape position*. Biogeochemistry 68 : 51-70.
- PARÉ, D., P. ROCHON et S. BRAIS, 2002. *Assessing the geochemical balance of managed boreal forests*. Ecological Indicators 1 : 293-311.

- RUSTAD, L.E., I.J. FERNANDEZ, R.D. FULLER, M.B. DAVID, S.C. NODVIN et W.A. HALTEMAN, 1993. *Soil solution response to acidic deposition in a northern hardwood forest*. Agricultural Economics 47 : 117-134.
- SAUCIER, J.P., J.F. BERGERON, P. GRONDIN et A. ROBITAILLE, 1998. *Les régions écologiques du Québec méridional (3<sup>e</sup> version) : un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles du Québec*. Supplément de l'Aubelle 124. 12 p.
- TAMM, C.O. et L. HALLBÄCKEN, 1988. *Changes in soil acidity in two forest areas with different acid deposition : 1920s to 1980s*. Ambio 17 : 56-61.
- THIFFAULT, E., D. PARÉ, N. BÉLANGER, A.D. MUNSON et F. MARQUIS, 2006. *Harvesting intensity at clear-felling in the boreal forest: impact on soil and foliar nutrient status*. Soil Science Society of America Journal 70 : 691-701.
- TOMLINSON, G.H., 2003. *Acidic deposition, nutrient leaching and forest growth*. Biogeochemistry 65 : 51-81.
- UBA, 2004. *Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects risks, and trends. Chapter 5. Mapping critical loads*. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. 44 p.
- WATMOUGH, S. et P. DILLON, 2004. *Major element fluxes from a coniferous catchment in central Ontario, 1983-1999*. Biogeochemistry 67 : 369-398.
- WATMOUGH, S.A. et P.J. DILLON, 2003. *Base cation and nitrogen budgets for seven forested catchments in central Ontario, 1983-1999*. Forest Ecology and Management 177 : 155-177.





La Direction de la recherche forestière (DRF) a pour mandat de participer activement à l'amélioration de la pratique forestière au Québec en réalisant des travaux, principalement à long terme et d'envergure provinciale, qui intègrent des préoccupations de recherche fondamentale et appliquée. Elle subventionne aussi des recherches universitaires à court ou à moyen terme. Ces recherches, importantes pour le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), sont complémentaires aux travaux de la DRF ou réalisées dans des créneaux où elle ne s'implique pas. Elle contribue à la diffusion de nouvelles connaissances, d'avis et de conseils scientifiques et à l'intégration de ces nouvelles connaissances ou savoir-faire à la pratique forestière.