

**RECOLTE DE LA BIOMASSE FORESTIERE : EFFETS
SUR L'EXPORTATION D'ELEMENTS NUTRITIFS ET
MISE EN PLACE D'UN DISPOSITIF DE SUIVI A
LONG TERME**

Rapport Final

Présenté à

Lauzon – Ressources forestières

et au

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune

Préparé par



INSTITUT QUÉBÉCOIS D'AMÉNAGEMENT
DE LA FORÊT FEUILLUE

Mai 2012

ÉQUIPE DE REALISATION DE L'IQAFF

Coordonnateurs scientifiques et de rédaction : Philippe Nolet, M.Sc.
Sylvain Delagrange, Ph.D.
Marie-Ève Roy, M. Sc.

Équipe technique : Régis Pouliot, Serge Raposo, Pascal Rochon, Nadia Bergeron, Chloé Makepeace, Maxime Archambault

IQAFF : Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue

58 Principale, Ripon, Québec, J0V 1V0

Tél : 819-983-6589 ; Fax : 819-983-6588

Pour citation : Nolet, P., Delagrange, S. et Roy, M.-E. 2012. Récolte de la biomasse forestière : Effets sur l'exportation d'éléments nutritifs et mise en place d'un dispositif de suivi à long terme. Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Québec. Rapport Final. 50 p. + annexes.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été financé par le Programme de Mise en Valeur des Ressources du Milieu Forestier, Volet I (Acquisition de connaissances/recherche) du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec.

RESUME

La récolte de la biomasse forestière soulève des enjeux économiques et écologiques. Dans le cadre du présent projet, nous nous sommes penchés sur 2 volets : **volet 1** : l'exportation supplémentaire des éléments nutritifs associée à la récolte de biomasse et **volet 2** : les effets potentiels de la récolte de biomasse sur la biodiversité faunique et floristique. Dans le cadre du premier volet, nous avons quantifié la teneur en éléments nutritifs de 48 arbres (24 érables à sucre et 24 bouleaux jaunes) des régions de l'Outaouais et des Laurentides. La teneur en éléments a été quantifiée pour 4 compartiments : le tronc, les branches de 5-10 cm, les branches de 2 à 5 cm et les branches de moins de 2 cm. Nous avons observé des différences importantes entre les deux espèces pour le calcium, le potassium et le phosphore. Nous avons aussi remarqué que la répartition des éléments dans les différents compartiments est principalement influencée par le diamètre des arbres puisque l'allocation de biomasse totale aux différents compartiments est intimement liée à leur DHP. Aussi, nous avons procédé à un exercice de modélisation afin d'évaluer l'effet de divers modes de récolte et de 2 types de coupe partielle sur l'exportation d'éléments, et ce, en fonction de deux types de composition de peuplement. Les résultats sont clairs : plus on récolte de biomasse, plus on récolte d'éléments nutritifs. Les effets du type de coupe partielle (CJ ou CDL) et de la composition des peuplements sont relativement faibles. En nous basant sur nos résultats et sur la littérature, nous sommes d'avis, dans l'état actuel des connaissances, qu'il est risqué pour le fonctionnement et la productivité des écosystèmes de permettre la récolte de la biomasse forestière en forêt feuillue. Pour le second volet, nous en sommes à l'étape de mise en place du dispositif. Dans 4 peuplements d'érablière à bouleau jaune (2 en Outaouais et 2 dans les Laurentides), nous avons testé 4 modes de récolte de biomasse (1 ha par mode) : témoin (aucun traitement) ; coupe de jardinage sans récolte de biomasse ; coupe de jardinage avec récolte des branches plus petites que 5 cm et coupe de jardinage avec retrait complet des cimes. Dans chacun des blocs de 1 ha, nous avons procédé à des inventaires appropriés pour caractériser la régénération, le cortège floristique, les petits mammifères et l'herpétofaune avant traitement. Les traitements ont eu lieu à l'automne 2011/hiver 20102. Nous présentons des résultats sommaires de l'installation de ce dispositif. Afin de ne pas perdre l'investissement important que nécessite la mise en place d'un tel dispositif, il sera important d'en assurer un suivi dans les prochaines années.

TABLE DES MATIERES

Équipe de réalisation de l'IQAFF*	i
Remerciements	ii
Résumé.....	iii
Liste des Tableaux	v
Liste des Figures	vi
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : L'exportation des éléments nutritifs	2
Introduction	2
Territoire et Méthodologie	4
<i>Aires d'étude</i>	4
<i>Choix des arbres</i>	4
<i>Mesures dendrométriques et de biomasse fraîche</i>	5
<i>Mesures de laboratoire</i>	6
<i>Analyses statistiques et hypothèses</i>	8
<i>Analyses à l'échelle du peuplement</i>	10
Résultats.....	13
<i>Échelle de l'individu</i>	13
<i>Échelle du peuplement</i>	21
Discussion.....	25
Conclusion	30
Chapitre 2 : Mise en place d'un dispositif de suivi sur la biodiversité	31
Introduction	31
Territoire et méthodologie	33
<i>Description de la zone d'étude</i>	33
<i>Dispositif expérimental</i>	33
Mise en place du dispositif de suivi	35
<i>Prise de mesure</i>	37
Résultats.....	40
<i>Les peuplements forestiers</i>	40
<i>La régénération forestière et le cortège floristique</i>	40
<i>Les salamandres et les tritons</i>	41
<i>Les petits mammifères</i>	41
Références.....	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Résumé des caractéristiques des deux sites sélectionnés pour la récolte d'échantillons (à partir des informations Polyfor 4 ^{ème} décennal).....	4
Tableau 2: Séquence des mesures sur le terrain, en laboratoire et des calculs menant à l'obtention des variables d'intérêt pour chaque compartiment.	7
Tableau 3: Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse LMER avec comparaison de modèle. Les hypothèses correspondantes sont celles associées à la variable d'intérêt Qbiom (quantité de biomasse sèche).	9
Tableau 4: Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse LMER avec comparaison de modèle. Les hypothèses correspondantes sont celles associées à la variable d'intérêt Qx (où X est l'élément nutritif considéré).	10
Tableau 5: Peuplement type pur d'érable à sucre	11
Tableau 6: Peuplement type mixte à érable à sucre et bouleau jaune.....	12
Tableau 7: Compilation des meilleurs modèles expliquant la variation de la quantité de biomasse (Qbiom), la concentration en élément nutritif (Cx) et la quantité en éléments nutritifs (Qx). Le terme souligné correspond à la principale source de variation du modèle	14
Tableau 8: Comparaison des AIC obtenus par les divers modèles pour les éléments analysés à l'échelle du peuplement	22
Tableau 9: Les différents traitements et les superficies échantillonnées.....	35
Tableau 10: La surface terrière avant traitement dans les diverses placettes permanentes.	40
Tableau 11: Liste des noms latin et code utilisé pour les espèces les plus fréquentes dans cette étude.	42
Tableau 12: Quantité par espèces de salamandres et de tritons dans les sites et parcelles d'études.....	43
Tableau 13: Quantité de capture ou recapture par espèces lors des 8 relevés de cage de petit mammifères dont 4 le matin et 4 le soir pour les parcelles à l'étude (soit 9 microsites par parcelles).....	44
Tableau 14: Quantité de passage par espèces lors des 8 relevés de piste de sable de petit mammifères dont 4 le matin et 4 le soir pour les parcelles à l'étude (soit 9 microsites par parcelles).....	45
Tableau 14 (suite): Quantité de passage par espèces lors des 8 relevés de piste de sable de petit mammifères dont 4 le matin et 4 le soir pour les parcelles à l'étude (soit 9 microsites par parcelles).....	46

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des sites d'étude dans les régions de l'Outaouais et des Laurentides.....	5
Figure 2: Représentation graphique des 2 termes du meilleur modèle expliquant la variabilité de la quantité de biomasse sèche au sein d'individus d'érable à sucre et de bouleau jaune. 15	15
Figure 3: Représentation graphique du terme SP*COMP du meilleur modèle expliquant la variabilité de la quantité d'élément nutritif (Q _x ; g) sein d'individus d'érable à sucre et de bouleau jaune.....	18
Figure 4: Représentation graphique du terme DHP*COMP du meilleur modèle expliquant la variabilité de la quantité d'élément nutritif (Q _x ; g) sein d'individus d'érable à sucre et de bouleau jaune.....	19
Figure 5: Représentation graphique du meilleur modèle (Terme : DHP*COMP, cf. Annexe II) expliquant la variation de la quantité d'aluminium (Q _{Al}) dans les individus d'érable à sucre et de bouleau jaune.	20
Figure 6 : Quantité moyenne de biomasse et de nutriments (kg/ha) exportée en fonction des divers modes de récolte et du type de coupe partielle pour des peuplements virtuels pur et mixtes.....	23
Figure 7. Quantité de Ca exportée en fonction de la biomasse exportée, du mode récolte, du type de récolte et de la composition du peuplement. Voir Figure 6 et la méthodologie pour plus de détails.....	24
Figure 8: Localisation des différents sites d'études pour l'étude de la biodiversité.....	34
Figure 9 : Dispositif d'échantillonnage pour une parcelle de 1 ha.....	36

INTRODUCTION GENERALE

Les grands objectifs de cette étude étaient (i) d'évaluer à court terme, l'impact du traitement sylvicole intitulé « récolte intégrée de la biomasse forestière » sur les différentes composantes du fonctionnement de l'écosystème forestier et (ii) d'installer un dispositif de suivi de ces effets à moyen et long terme.

La récolte intégrée de la biomasse forestière en régime de coupe partielle apporte des défis importants, de telle sorte que la façon (ou les façons) dont elle sera opérationnalisée n'est encore pas arrêtée. Par exemple, on ne connaît pas jusqu'à quel diamètre fin bout cette récolte doit être effectuée. Il est probable que pour les chantiers proches des usines, il soit possible de récolter des branches de plus petits diamètres. Autres exemples, on ne sait pas si la récolte se fera par arbre entier ou par tronc entier, ni en combien d'étapes l'ensemble du traitement se fera. Ne sachant pas, à ce jour, quelles seront les modalités de récolte de biomasse qui seront adoptées en coupe partielle, il est difficile, voire impossible, d'évaluer opérationnellement les effets d'un tel traitement. Dans ce contexte, nous avons donc élaboré une approche souple qui nous permettra, une fois les modalités de traitements définies, d'appréhender les effets sur la régénération forestière, l'intégrité des sols, la biodiversité et le bois mort.

Dans le **premier chapitre** de cette étude, nous présentons ainsi l'effet potentiel de divers modes de récolte de la biomasse forestière sur l'exportation d'éléments minéraux. Cette étude est basée sur l'étude de 48 érables à sucre et bouleaux jaunes pour lesquels nous avons déterminé la concentration de plusieurs éléments dans divers compartiments des arbres. Dans le **second chapitre**, nous décrivons l'installation d'un dispositif expérimental mis en place à l'été 2011 qui permettra à moyen-long terme de vérifier comment différents modes de récolte de biomasse forestière influencent la régénération forestière, la biodiversité (floristique et faunique) ainsi que la dynamique de bois mort.

CHAPITRE 1 : L'EXPORTATION DES ELEMENTS NUTRITIFS

Introduction

Dans un contexte de demande croissante pour les énergies renouvelables, la biomasse des forêts a rapidement été identifiée comme une importante ressource énergétique. Au Canada, l'utilisation de la biomasse forestière à des fins énergétiques représente un fort potentiel en raison de la disponibilité de la ressource et de la présence d'un secteur forestier bien développé (Paré et al., 2011). Cela est particulièrement vrai en forêt feuillue où les opérations forestières laissent derrière elles les branches de moins de 10 cm de diamètre (ou plus parfois). Pour un érable à sucre mature (ex. 40 cm de DHP), la proportion de biomasse non récoltée peut représenter 35 % de sa biomasse aérienne (Yanai, 1998); cette proportion peut ainsi être considérée disponible pour la production d'énergie. Dans les dernières années au Québec, la récolte de la biomasse (nous entendons ici les branches de 10 cm et moins) a reçu davantage d'attention vu le double désir de rencontrer les besoins grandissants en énergie et de diversifier le secteur forestier. Toutefois, la récolte de biomasse forestière soulève de nouvelles questions quant à ses effets sur l'écosystème forestier, et ce, tant à l'égard de sa structure que de ses fonctions. La plupart des études qui ont abordé ce sujet ont été menées dans des forêts conifériennes; ces études ont touché à des aspects très variés telles la qualité des sols, la qualité d'habitats, la diversité floristique, la régénération, et la productivité. Certaines études n'ont démontré aucun effet significatif (ou durable) de différents niveaux de récolte de biomasse sur la disponibilité en azote dans le sol, la croissance de la régénération ou de sa survie (Staaf and Olsson, 1994; Fleming et al., 2006; Thiffault et al., 2006; Slesak et al., 2010). Toutefois, plusieurs autres études ont détecté des effets négatifs de la récolte de la biomasse forestière sur i) la biodiversité faunique et floristique (Olsson and Staff, 1995; Sohlenius, 1996; Åström et al., 2005), ii) la concentration en éléments nutritifs des sols (Brais et al., 2002; Thiffault et al., 2011) iii) la croissance de la régénération (Brais et al., 2002) et iv) la productivité forestière dans son ensemble (Miller, 1995). De plus, la récolte de biomasse forestière crée une intensification du passage de la machinerie forestière, ce qui peut causer, par la compaction, des effets négatifs supplémentaires sur la fertilité des sols (Page-Dumroese et al., 2006). Il demeure que l'on anticipe que l'impact le plus important de la récolte de biomasse sur la fertilité des sols sera lié à la perte d'éléments nutritifs, et ce, spécialement sur les sites initialement peu fertiles (Adegbi et al., 2001; Rytter, 2002). Cela est anticipé parce que la concentration en éléments nutritifs est

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

reconnue pour augmenter à mesure que le diamètre des tiges diminue (Lemoine et al., 1990; Duchesne and Houle, 2008). Mann et al. (1988) évalue que la perte en nutriments peut doubler en utilisant la récolte par arbre entier au lieu de la récolte par tronçonnage.

Dans les peuplements dominés par l'érable à sucre, la diminution de nutriments constitue un risque important puisqu'il y a une littérature abondante sur les faibles teneurs en cations et des répercussions anticipées de leur diminution sur la dynamique de ces écosystèmes et sur leur productivité (Vadeboncoeur, 2010). Dans ce contexte, les forestiers ont besoin 1) de connaître les pertes potentielles en nutriments causées par la récolte de biomasse et 2) d'identifier des directives sylvicoles qui peuvent diminuer ces pertes.

Le but principal du volet de cette étude est de quantifier comment la concentration des nutriments se distribue dans les différentes parties des tiges de deux essences abondantes en forêt feuillue: le bouleau jaune et l'érable à sucre. Ce but général mène à 2 objectifs spécifiques :

- Quantifier comment le diamètre minimal de récolte affecte l'exportation d'éléments nutritifs, et ce, à l'échelle de la tige et du peuplement.
- Quantifier comment la composition forestière et des directives sylvicoles peuvent affecter l'exportation de nutriments à l'échelle du peuplement.

Pour ce faire, nous avons sélectionné des tiges des deux essences mentionnées et mesuré la concentration et la quantité de 7 éléments majeurs (N, P, Ca, Mg, Al, K et Na) dans chacun des compartiments ligneux des tiges. Nous avons par la suite modélisé à l'échelle du site comment l'exportation de ces éléments est influencée par diverses directives de récolte.

Territoire et Méthodologie

Aires d'étude

Considérant le territoire ciblé, deux espèces ont été sélectionnées (i.e. l'érable à sucre (*Acer saccharum*) et le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*)) pour faire l'étude des concentrations en nutriment dans l'arbre. La sélection des sites d'étude a donc été faite à l'intérieur de peuplements caractérisés comme des érablières à bouleau jaune, en Outaouais et dans les Laurentides. Le premier peuplement choisi est localisé dans la réserve faunique Papineau-Labelle en Outaouais (Figure 1). Le second peuplement sélectionné se trouve dans la région des Laurentides à l'ouest de Mont-Laurier (Figure 1). Les critères importants de sélection de ces deux sites étaient i) la présence d'un minimum de 30% de bouleau jaune dans le couvert afin de s'assurer une bonne disponibilité des deux essences et ii) l'appartenance des peuplements au régime de coupe partielle mais dont la dernière intervention remontait au moins à 15 ans, afin de s'assurer la disponibilité d'un large gradient de DHP. Un résumé des principales caractéristiques des deux sites choisis est présenté dans le Tableau 1.

Tableau 1. Résumé des caractéristiques des deux sites sélectionnés pour la récolte d'échantillons (à partir des informations Polyfor 4^{ème} décennal)

	Région	Type Peu.	Pertu.	Sup.	Dépôt	Pente	Densité	Cl_Haut	
Site 1	OUT	ErBj	VIN	CJ 1995	14.2	2A	B	B	2
Site 2	LAU	ErBj	VIN	CJ 1993	9.6	1A	B	B	1

Codes : ErBj : Érablière à bouleau jaune, Type Peu : Type de peuplement, Sup : superficie, Cl_Haut : Classe de hauteur

Choix des arbres

Dans les deux peuplements échantillonnés, l'érable à sucre et le bouleau jaune représentaient plus de 80% des arbres marchands sur pied. Ces deux espèces ont été échantillonnées à raison de 12 arbres par espèce et par site ($N_{tot} = 48$). Au sein de chaque espèce et de chaque site, les 12 arbres ont été choisis le long d'un gradient de DHP (allant de 14 à 34cm). Pour réaliser ce choix, l'ensemble des érables à sucre et des bouleaux jaunes (sains et sans pertes majeures de branchage) sur une superficie d'environ 1 hectare ont été classés en 4 classes de DHP (A : 14 à 18, B : 19 à 23, C : 24 à 29 et D : 30 à 35 cm) et 3 individus par espèce ont été choisis aléatoirement parmi ces classes.

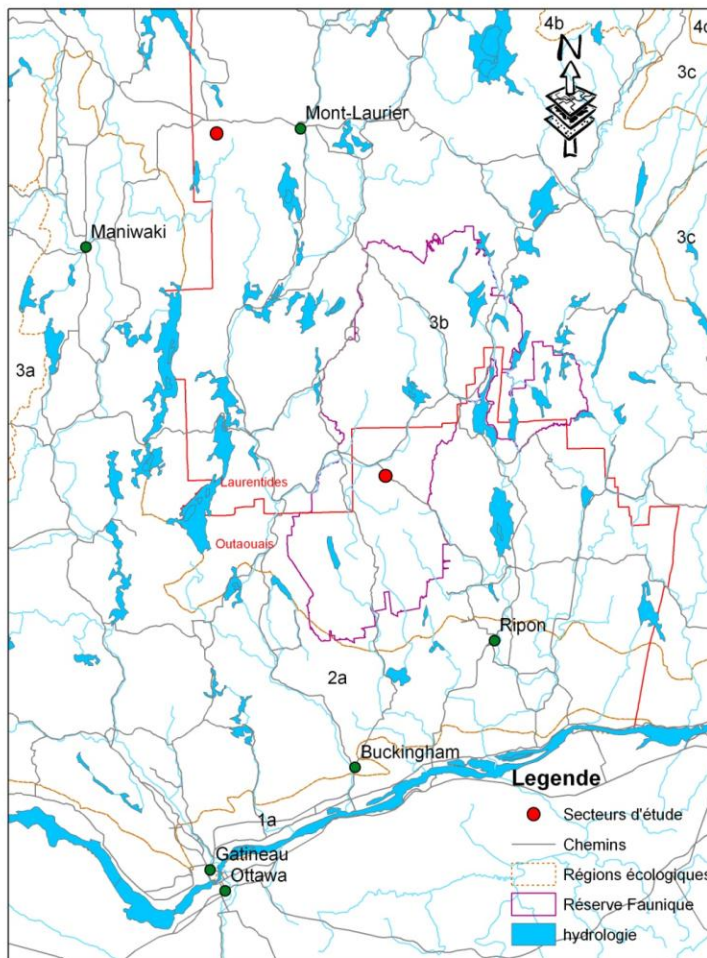


Figure 1 : Localisation des sites d'étude dans les régions de l'Outaouais et des Laurentides

Mesures dendrométriques et de biomasse fraîche

L'ensemble des mesures dendrométriques et de biomasse s'est effectué sur le terrain en 4 grandes étapes :

Étape 1 : Mesure du DHP, sélection de l'arbre, abattage à 30 cm du sol et mesure de la hauteur au vertex (avec ajout du 30 cm de la souche). Mesure des diamètres des grosses branches (pour le calcul du volume de ce compartiment).

Étape 2 : Découpe de l'arbre au sol en 4 compartiments. Compartiment TRONC : Tronc et branches avec diamètre fin bout de 10cm. Compartiment GROSSES BRANCHES : Branches dont le diamètre est compris entre 10 et 5cm. MOYENNES BRANCHES : Branches dont le diamètre est

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

compris entre 5 et 2cm. PETITES BRANCHES : Branches dont le diamètre est inférieur à 2cm (bois raméal).

Étape 3 : pesée des trois compartiments de branche à l'aide d'un peson électronique (REF, capacité 20 à 200kg, précision 0.1kg).

Étape 4 : Prélèvement d'échantillons de chaque compartiment. Pour le tronc, une galette à la souche (détermination de l'âge) et au DHP (dosage éléments nutritifs) ont été récoltées et étiquetées. Pour chacun des 3 compartiments de branches, un fagot de sections de branches récoltées à différents endroits de la cime a été collecté et étiqueté.

Mesures de laboratoire

De retour au laboratoire, le volume des galettes de DHP a été déterminé par immersion complète dans un récipient d'eau posé sur une balance taré. En effet, grâce aux propriétés physiques de l'eau (masse volumique de 1), la poussée exercée en g du volume d'eau déplacé par le volume de bois est égal au volume de bois en ml. Ensuite, les 4 sous échantillons (galette au DHP et fagots) de chacun des compartiments ont été pesés pour en déterminer la masse fraîche, puis mis à sécher à une température oscillant entre 40 et 60 degrés Celsius dans un séchoir ventilé. Chaque jour, l'ensemble des échantillons était pesé et la masse sèche des échantillons a été constatée lorsque celle-ci était constante 3 jours de suite.

Une fois sec, un sous échantillon de 500g a été prélevé (une pointe de tarte (avec écorce) pour la galette au DHP et une section de tous les rameaux (avec bourgeons pour le bois raméal) pour les fagots) et broyé dans un broyeur à café. La poudre de bois a ensuite été envoyée dans un laboratoire d'analyse (LABO ANALYSE) pour en connaître la concentration en N, P, Ca, Mg, Na, et K. Les éléments N et P ont été dosés par la méthode de boues solides alors que les 5 autres éléments ont été dosés par la méthode ICP-AES.

Estimation des quantités et concentrations pour les masses sèches (via la mesure du volume et/ou de la masse fraîche)

Pour arriver aux variables d'intérêt que sont la quantité de biomasse en g de matière de chaque compartiment, la concentration des éléments dans la matière sèche et la quantité totale (masse en g) de chaque élément dans chaque compartiment, la séquence décrite dans le Tableau 2 a été suivie.

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Il est à noter que la quantité (masse) de chaque élément dans un compartiment est le produit de la quantité (biomasse sèche) de ce compartiment et de la concentration (dans la biomasse sèche) de cet élément dans ce compartiment.

Tableau 2: Séquence des mesures sur le terrain, en laboratoire et des calculs menant à l'obtention des variables d'intérêt pour chaque compartiment.

COMPARTIMENT	Mesures terrain	Mesures laboratoire	Analyses
TRONC	Volume	<ul style="list-style-type: none"> - Volume du sous échantillon. - Masse fraîche et sèche du sous échantillon (galette du DHP). - Concentration en éléments dans la masse sèche. 	<ul style="list-style-type: none"> - Masse sèche totale du tronc. - Concentration en éléments dans matière sèche. - Quantités (masses) de chaque élément
BRANCHES (grosses, moyennes et petites)	Masse fraîche	<ul style="list-style-type: none"> - Masse sèche du sous échantillon (galette du DHP). - Concentration en éléments dans la masse sèche. 	<ul style="list-style-type: none"> - Masse sèche total du compartiment. - Concentration en éléments dans matière sèche. - Quantités (masses) de chaque élément

Une vérification de la quantité totale de biomasse sèche estimée par nos méthodes en fonction du DHP pour chacune des deux espèces a été faite en comparant nos résultats aux équations de Lambert et al. (2005). Pour les deux espèces, les équations de Lambert et al. (2005) s'ajustent très bien aux arbres de nos deux régions.

Analyses statistiques et hypothèses

A l'échelle de l'individu, 3 analyses ont été conduites chacune portant sur les 3 variables d'intérêts, soient: la quantité de biomasse sèche de chaque compartiment (Q_{biom_i} ; kg), la concentration de l'élément X dans la matière sèche (C_x ; mg.kg^{-1}) de chaque compartiment et la masse totale de l'élément X (Q_x ; g) dans chaque compartiment. Cependant, à des fins de simplification, l'analyse des concentrations (C_x) a été portée en annexes et seules les analyses des quantités de biomasse sèche et d'éléments dans chaque compartiment seront présentées dans le corps du texte. Il est à noter que les trois analyses sont identiques et correspondaient à une approche de comparaison de modèles linéaires mixtes (i.e. combinant des effets fixes et des effets aléatoires) avec le but de déterminer quel modèle parmi l'ensemble testé, expliquait le mieux la variabilité de nos données. Les variables aléatoires considérées étaient l'individu et la région (i.e., le site ou le peuplement). En effet, la région a été considérée comme un facteur aléatoire puisqu'une analyse préliminaire (non présentée) nous a montré qu'il n'existait pas de différences dans les patrons observés entre les 2 régions. Les variables fixes considérées ont été : (i) le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), (ii) l'espèce (SP), (iii) le compartiment (COMP) et (iv) l'âge (AGE). Sur la base de ces 4 variables explicatives, 6 modèles ont été testés et comparés selon la méthode de Anderson et al. (2000). Basé sur la littérature et par soucis de parcimonie, seulement 6 modèles ont été testés parmi l'ensemble des combinaisons possibles. Dans les Tableau 3 et Tableau 4, la liste des modèles et des hypothèses qu'ils représentent a été dressée pour la quantité de biomasse sèche totale et pour la quantité d'éléments nutritifs. Les 6 modèles ont été réalisés et comparés pour chaque élément nutritif séparément afin de tirer des conclusions spécifiques. L'ensemble des analyses statistiques a été fait avec le logiciel R sous l'émulateur graphique R Commander (Rcmdr) et le package 'lme4'.

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Tableau 3: Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse LMER avec comparaison de modèle. Les hypothèses correspondantes sont celles associées à la variable d'intérêt Qbiom (quantité de biomasse sèche).

ID	MODELE	HYPOTHESES
1	COMP	Selon la littérature, le compartiment est une source très importante de variabilité en biomasse sèche et pourrait être la seule source de variabilité.
2	SP* COMP	Les différences entre compartiments pourraient évoluer distinctement entre les espèces.
3	DHP* COMP	Les différences entre compartiments pourraient évoluer distinctement avec l'augmentation du DHP.
4	Age* COMP	Les différences entre compartiments pourraient évoluer distinctement avec le vieillissement de l'arbre et ses modifications architecturales.
5	SP* COMP +DHP* COMP	Addition des 2 hypothèses des modèles 2 et 3
6	SP* COMP +Age* COMP	Addition des 2 hypothèses des modèles 2 et 3

nb : l'âge et le DHP ne pouvaient intervenir dans le même modèle du fait de leur intercorrélation.

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Tableau 4: Liste des modèles testés et comparés dans l'analyse LMER avec comparaison de modèle. Les hypothèses correspondantes sont celles associées à la variable d'intérêt Qx (où X est l'élément nutritif considéré).

ID	MODELE	HYPOTHESES
1	COMP	Selon la littérature, le compartiment est une source très importante de variabilité en éléments nutritif (via une concentration très distincte entre les compartiments mais aussi via les différences de quantité de biomasse sèche)
2	SP* COMP	Le patron de variabilité entre les compartiments pourrait différer entre espèces pour un ou plusieurs compartiments
3	DHP* COMP	Le patron de variabilité entre les compartiments pourrait différer avec l'augmentation du DHP par effet d'accumulation de biomasse et de piégeage des éléments nutritifs dans la biomasse.
4	Age* COMP	Le patron de variabilité entre les compartiments pourrait différer avec l'augmentation de l'âge par effet d'un piégeage des éléments nutritifs dans la cerne (qu'elle soient large ou petite)
5	SP* COMP +DHP* COMP	Addition des 2 hypothèses des modèles 2 et 3
6	SP* COMP +Age* COMP	Addition des 2 hypothèses des modèles 2 et 3

Analyses à l'échelle du peuplement

Afin d'évaluer à l'échelle du peuplement les effets de divers facteurs sur le retrait de biomasse et d'éléments minéraux suite à une récolte, nous avons développé une approche permettant de reconstruire virtuellement des peuplements forestiers à partir des 48 arbres échantillonnés décrits plus haut. Cette approche consiste à considérer ces 48 arbres comme étant une banque

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

d'arbres (BA) représentatifs de ce que l'on peut rencontrer sur le territoire. Nous posons donc comme prémisses que les arbres échantillonnés sont représentatifs des arbres des mêmes espèces en termes de répartition de la biomasse et de concentration des éléments nutritifs dans les compartiments mesurés.

À partir de cette prémisses, nous avons bâti un outil informatique (OI) qui permet de créer des peuplements virtuels basés sur un peuplement-type. Dans le cadre du présent projet, nous avons utilisé 2 peuplements-type : un peuplement pur d'érable à sucre (Tableau 5) et un peuplement mixte d'érable à sucre et bouleau jaune (Tableau 6). Afin de créer un peuplement, l'OI choisit aléatoirement des arbres de la façon suivante. Pour un DHP donné du peuplement type, **1)** l'OI identifie les 6 arbres de la BA qui sont les plus près de ce DHP, puis **2)** choisit un de ces arbres aléatoirement. La biomasse de cette tige est calculée en fonction des relations DHP-biomasse-essence que nous avons développées (Nolet et al., 2011). Toutefois, la répartition de cette biomasse dans les différents compartiments de la tige et la concentration des éléments nutritifs dans ces compartiments sont celles observées dans l'arbre choisi aléatoirement. L'étape 2 est répétée, pour un DHP donné, autant de fois qu'indiqué dans la table du peuplement-type. Puis, les étapes 1 et 2 sont répétées pour les autres DHP indiqués dans la table du peuplement-type. Un premier peuplement est ainsi créé. L'OI peut créer autant de peuplements que désiré; dans notre cas nous avons créé 1000 répliquats représentatifs du peuplement-type pur et 1000 répliquats représentatifs du peuplement-type mixte.

Tableau 5: Peuplement type pur d'érable à sucre

Essence	DHP	Nombre-tiges	Récolte- CJ	Récolte-CDL
ERS	12	250	0.3	0
ERS	18	170	0.3	0
ERS	24	110	0.3	0
ERS	30	70	0.3	0
ERS	36	50	0.3	0.8
ERS	40	30	0.3	1

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Tableau 6: Peuplement type mixte à érable à sucre et bouleau jaune

Essence	DHP	Nombre-tiges	Récolte- CJ	Récolte-CDL
ERS	12	125	0.3	0
ERS	18	85	0.3	0
ERS	24	55	0.3	0
ERS	30	35	0.3	0
ERS	36	25	0.3	0.8
ERS	40	15	0.3	1
BOJ	12	125	0.3	0
BOJ	18	85	0.3	0
BOJ	24	55	0.3	0
BOJ	30	35	0.3	0
BOJ	36	25	0.3	0.8
BOJ	40	15	0.3	1

Afin de vérifier l'effet de différentes directives de martelage sur le retrait d'éléments nutritifs, nous avons simulé, sur tous les réplicats, 2 scénarios de martelage simple : coupe de jardinage (CJ) et coupe à diamètre-limite (CDL) à 30% d'intensité de surface terrière dans les 2 cas. Dans le cas de la CJ, nous avons simulé une récolte de 30 % de toutes les classes de DHP alors que pour la CDL, nous avons simulé la récolte des tiges les plus grosses (Tableau 5 et Tableau 6). Nous aurions pu procéder à un martelage aléatoire des tiges, mais afin de simplifier les calculs, nous avons simplement appliqué une proportion de récolte à chaque tige. Bien évidemment, cela n'aurait aucun sens en forêt de récolter 30 % d'une tige, mais dans le cas de simulation, cela ne crée pas de problème de logique mathématique. Aussi, cela nous assure que, si nous voyons des différences d'exportation de nutriments pour un réplicat donné entre la CJ et la CDL, ces différences ne sont pas dues à un effet aléatoire de choix de tige. Enfin, l'OI calcule pour chaque réplicat et pour chaque scénario de martelage, la quantité de biomasse et d'éléments nutritifs récoltés, et ce, par compartiments. En connaissant cette répartition par compartiment, on peut estimer l'effet de divers modes de récolte de la biomasse. Dans notre cas, nous avons pu comparer la récolte par arbre entier, la récolte jusqu'à un diamètre de 2 cm, la récolte jusqu'à un diamètre de 5 cm et la récolte jusqu'à un diamètre de 10 cm.

Nous avons par la suite voulu comprendre l'impact relatif du mode de récolte, des scénarios de martelage et de la composition des peuplements sur la quantité d'élément nutritifs récoltés. Pour ce faire, nous avons utilisé l'approche de comparaison par AIC (Anderson et al., 2000)

Résultats

Échelle de l'individu

Synthèse des comparaisons de modèle

Le Tableau 7 synthétise l'ensemble des 3 analyses réalisées par comparaison de modèles LMER. Les résultats détaillés des 3 analyses se retrouvent cependant dans les annexes I, II et III. Parmi les 6 modèles testés, il apparaît clair que le modèle comprenant l'addition des termes d'interaction SP*COMP et DHP*COMP est le meilleur modèle pour l'ensemble des variables regardées (Tableau 7). Toutefois, dans chaque analyse, une distinction (i.e. pondération) peut être faite entre les 2 termes composant ce meilleur modèle. En effet, dans l'analyse de Q_{biom} , le terme DHP*COMP est celui qui constituait la principale source de variation de la quantité de biomasse sèche dans les individus échantillonnés. A l'inverse, dans l'analyse de C_x , le terme SP*COMP est celui qui a généré la principale source de variation de la concentration en élément nutritif dans les individus mesurés. On notera ici que pour les éléments P, Mg, N et particulièrement Na, on ne peut ignorer que le meilleur modèle pouvait contenir le terme AGE*COMP (plutôt DHP*COMP) (cf. Annexe III). Finalement, dans l'analyse de la répartition de la quantité d'éléments nutritifs dans les individus d'érable à sucre et de bouleau jaune (Q_x), le terme DHP*COMP est celui qui était la principale source de variation, excepté pour Mg où la source de variation des 2 termes s'est avérée équivalente (Tableau 7 et Annexe II).

Répartition de la quantité de biomasse sèche dans l'individu

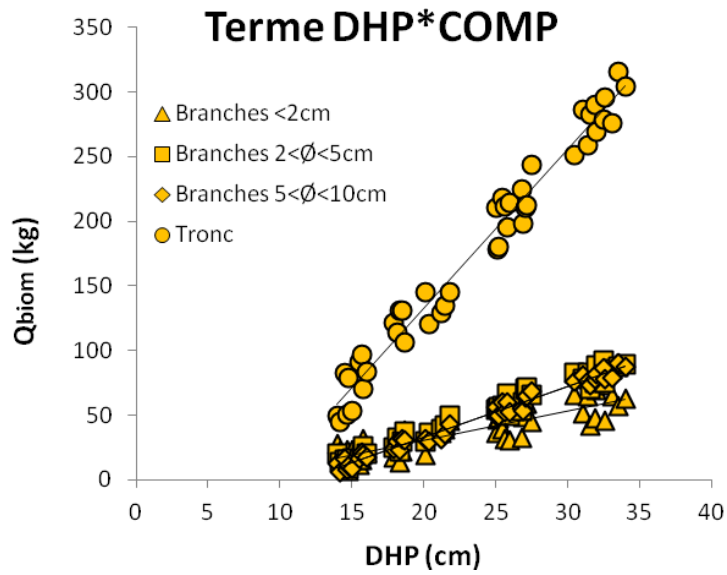
Pour la quantité de biomasse sèche, la source principale de variabilité a donc été la combinaison DHP*COMP (Figure 2-A) signifiant que les différences entre compartiments augmentaient avec l'augmentation du DHP. En effet, les arbres allouant de plus en plus de biomasse au tronc, ce compartiment prend de plus en plus de place dans la répartition de la biomasse sèche à l'intérieur de l'individu. Cependant, il existe un effet SP complémentaire (terme SP*COMP, Figure 2-B) qui démontre que les espèces peuvent répartir différemment leur biomasse au sein de leurs compartiments. Ainsi, on voit que l'ERS alloue plus de biomasse à son tronc que le BOJ et que l'allocation supplémentaire de biomasse dans la cime des BOJ (comparativement à l'ERS) se retrouve principalement dans les branches de diamètre inférieur à 5cm.

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Tableau 7: Compilation des meilleurs modèles expliquant la variation de la quantité de biomasse (Q_{biom}), la concentration en élément nutritif (C_x) et la quantité en éléments nutritifs (Q_x). Le terme souligné correspond à la principale source de variation du modèle

Meilleur modèle parmi les 6 comparés			
	Q_{biom}	C_x	Q_x
P	<u>SP*COMP+DHP*COMP</u>	<u>SP*COMP</u> +DHP*COMP (Age)	<u>SP*COMP</u> +DHP*COMP
Ca		<u>SP*COMP</u> +DHP*COMP	<u>SP*COMP</u> +DHP*COMP
K		<u>SP*COMP</u> +DHP*COMP	<u>SP*COMP</u> +DHP*COMP
Na		<u>SP*COMP</u> +AGE*COMP	<u>SP*COMP</u> +DHP*COMP
Mg		<u>SP*COMP</u> +DHP*COMP (Age)	<u>SP*COMP</u> +DHP*COMP
N		<u>SP*COMP</u> +DHP*COMP (Age)	<u>SP*COMP</u> +DHP*COMP
Al	<u>SP*COMP</u> +DHP*COMP	SP*COMP	DHP*COMP

A



B

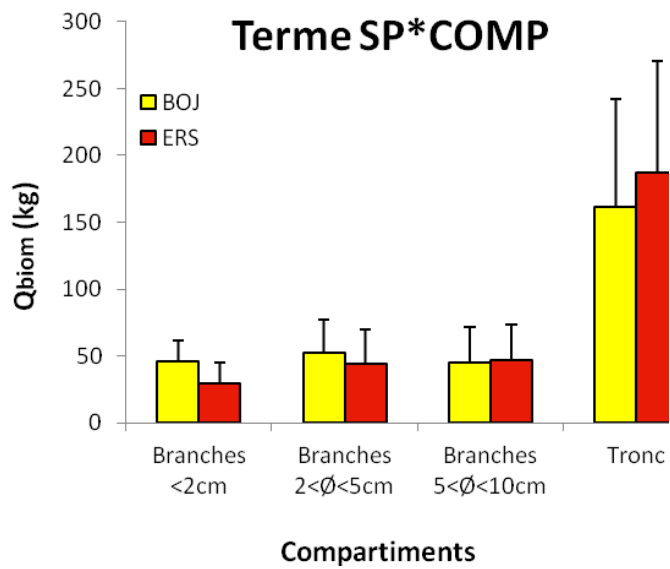


Figure 2: Représentation graphique des 2 termes du meilleur modèle expliquant la variabilité de la quantité de biomasse sèche au sein d'individus d'érable à sucre et de bouleau jaune (cf. Annexe I). (A) terme SP*COMP. (B) terme DHP*COMP.

Répartition des concentrations en éléments nutritifs dans l'arbre

Parmi les éléments que nous avons dosés, il a été possible d'identifier 4 groupes d'éléments en regard de la répartition de leur concentration dans l'arbre (données graphiques non montrées, analyses statistiques compilées dans l'Annexe III).

- 1- le groupe pour lequel le BOJ avait toujours une concentration supérieure à celle de l'ERS (p.ex. le **P**)
- 2- le groupe dont l'ERS avait toujours une concentration supérieure à celle du BOJ (p.ex. le **Ca** et le **K**)
- 3- le groupe dont le BOJ avait une concentration supérieure dans le bois raméal mais une concentration inférieure dans le tronc par rapport à l'ERS (p.ex. le **Mg**), et
- 4- le groupe pour lequel il existait très peu de différence entre les espèces (p.ex. l'**N** et le **Na**).

Répartition de la quantité de la quantité d'éléments nutritifs dans l'individu

Il est important de rappeler que la quantité d'un élément nutritif retrouvé dans les compartiments d'un arbre dépend de la quantité de biomasse que représente ce compartiment mais également la concentration de cet élément dans ce compartiment. Ainsi, les patrons de variation de Q_{biom} et de C_x peuvent avoir des effets antagonistes, neutres ou synergiques sur les patrons de variation de Q_x (Figure 3). Dans tous les cas, il est manifeste que l'augmentation du DHP, accroît la quantité de biomasse sèche des compartiments et donc augmente la quantité totale de chacun des éléments, d'où l'importance du terme $\text{DHP} \times \text{COMP}$ dans la variation de Q_x (Figure 4).

Dans le cas du **P**, (i) la concentration de cet élément augmentant avec la réduction du diamètre des tissus ligneux, (ii) sa concentration étant toujours supérieure chez le BOJ et (iii) le fait que le BOJ alloue plus dans sa cime que l'ERS, font en sorte qu'on retrouve beaucoup plus de P dans les cimes de BOJ mais qu'on retrouve des quantités similaires de P dans les troncs des 2 espèces.

Pour le **Ca** et le **K**, (i) la concentration de ces éléments augmentant avec la réduction du diamètre des tissus ligneux, (ii) leur concentration étant toujours supérieure chez l'ERS et (iii) le fait que l'ERS alloue plus à son tronc que le BOJ, font en sorte qu'on retrouve plus de Ca et de K

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

dans les tronc d'ERS que ceux de BOJ mais qu'il n'y a plus de différence entre espèce pour ces éléments dans la cime.

Pour le **Mg**, on voit clairement une synergie entre les patrons de variation de Q_{biom} et de C_{Mg} qui démontrent que le BOJ accumule le Mg dans son bois raméal alors que l'ERS l'accumule dans son tronc (Figure B). En effet, le BOJ possède une concentration de Mg beaucoup plus grande dans son bois raméal que l'ERS et sa quantité de bois raméal est plus élevée que l'ERS. Inversement, l'ERS possède une concentration de Mg beaucoup plus grande que le BOJ dans le tronc et sa quantité de tronc est plus élevée que le BOJ.

Dans le cas de l'**N** et du **Na**, la très faible différence en concentration entre espèces pour ces éléments fait en sorte qu'ils suivent de très près le patron de variation de la quantité de biomasse sèche (Q_{biom}) allouée aux différents compartiments (excepté pour Na dans les grosses branches où sa quantité est étonnement élevée du fait d'une concentration très élevée dans ce compartiment).

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

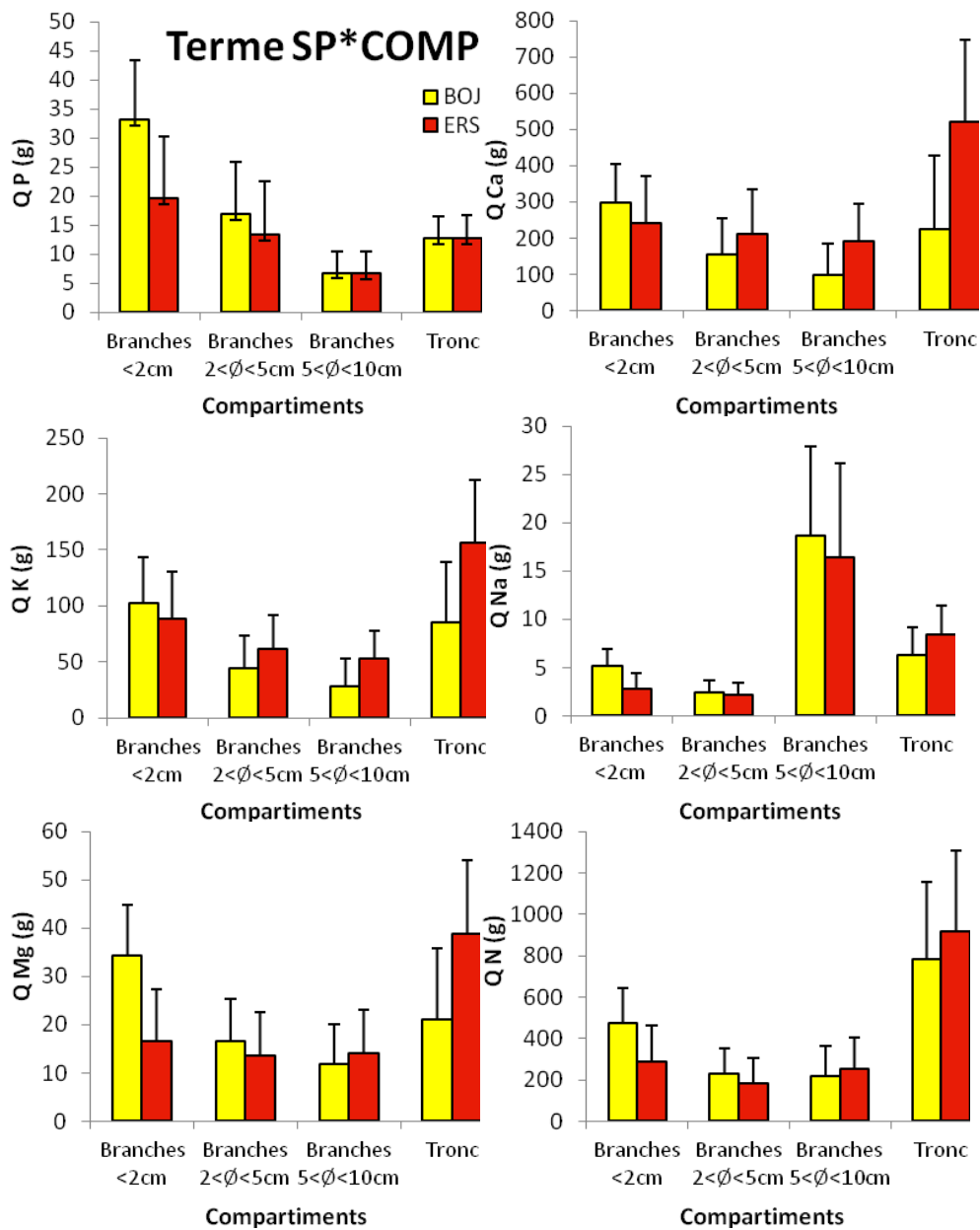


Figure 3: Représentation graphique du terme SP*COMP du meilleur modèle expliquant la variabilité de la quantité d'élément nutritif (Qx; g) sein d'individus d'érable à sucre et de bouleau jaune. (Pour P, Ca, K, Na et N le terme SP*COMP correspondait à la principale source de variation dans le meilleur modèle SP*COMP+DHP*COMP. Pour K, les 2 termes du modèle (SP*COMP et DHP*COMP) étaient des sources similaires de variation).

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

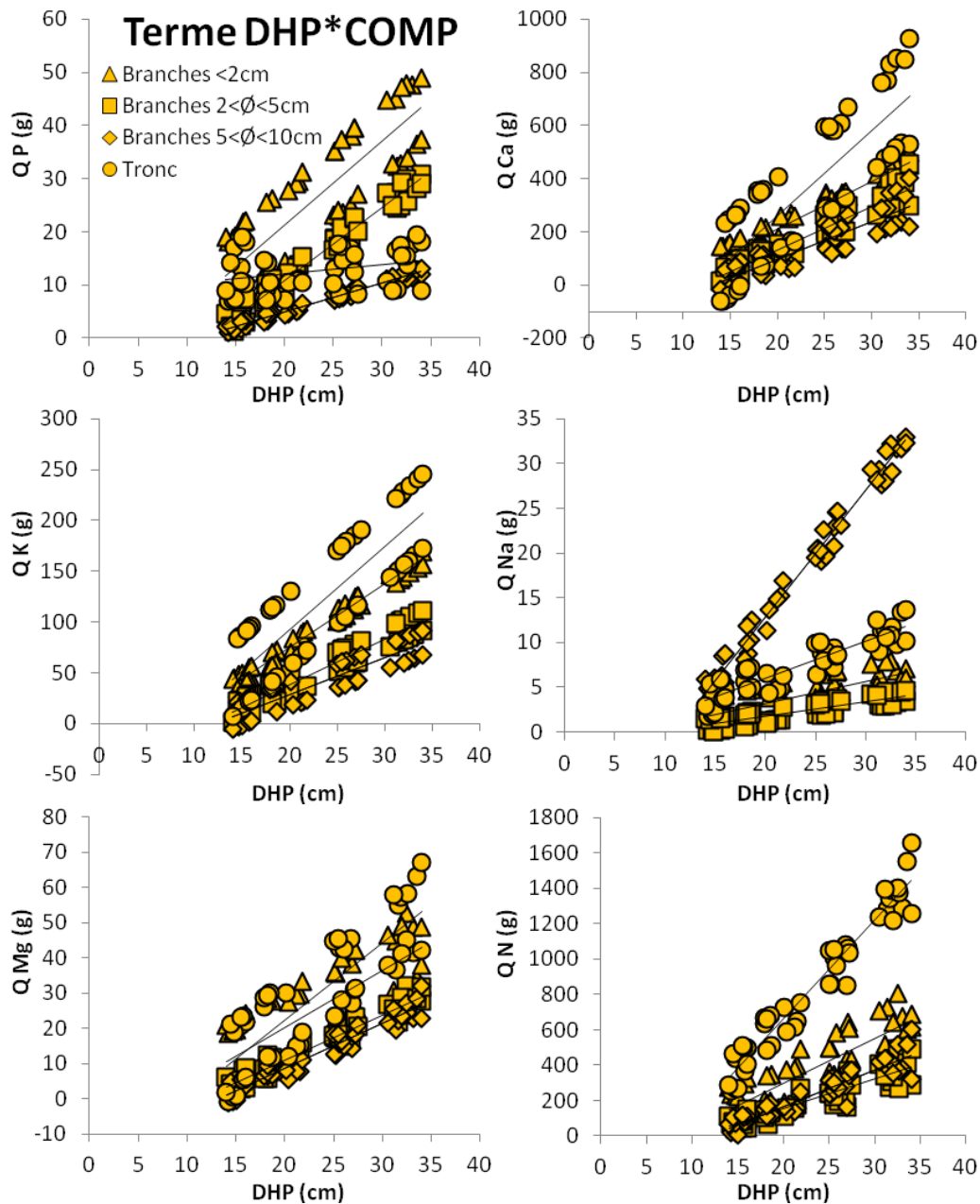


Figure 4: Représentation graphique du terme DHP*COMP du meilleur modèle expliquant la variabilité de la quantité d'élément nutritif (Qx; g) sein d'individus d'érable à sucre et de bouleau jaune. (Pour P, Ca, Na, N et K, le terme DHP*COMP ne correspondait à la principale source de variation dans le meilleur modèle SP*COMP+ DHP*COMP. Pour K, les 2 termes du modèle (SP*COMP et DHP*COMP) étaient des sources similaires de variation).

Le cas particulier de l'aluminium (Al)

Le cas particulier de l'Al, dont le meilleur modèle pour expliquer la concentration (C_{Al}) était le terme SP*COMP seul et le meilleur modèle pour expliquer la quantité (Q_{Al}) était le terme DHP*COMP seul (cf. Tableau 7), s'explique par le fait que cet élément se retrouvait en quantités très faibles dans la biomasse échantillonnée et qu'il se trouvait donc régulièrement au niveau du seuil de détection de l'appareil. La quantité très faible de cet élément en terme de concentration a donc fait en sorte que le patron de variation de la quantité d'Al dans l'arbre a suivi de très près celui de la variation de la répartition de la quantité de biomasse sèche (Q_{biom}) dans l'arbre (et donc plus particulièrement du terme DHP*COMP, Figure 5). Cependant, la répartition de la quantité d'Al dans l'arbre demeure très faible comparativement aux autres éléments.

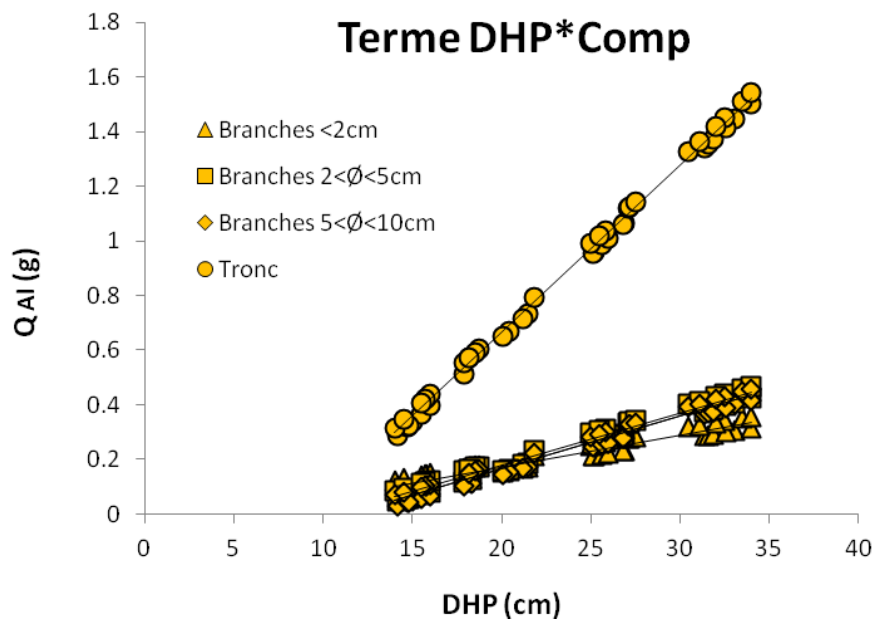


Figure 5: Représentation graphique du meilleur modèle (Terme : DHP*COMP, cf. Annexe II) expliquant la variation de la quantité d'aluminium (Q_{Al}) dans les individus d'érable à sucre et de bouleau jaune.

Échelle du peuplement

La quantité de biomasse récoltée est grandement influencée par le mode de récolte; c'est sans grande surprise que la quantité de biomasse récoltée diminue à mesure que l'on augmente le diamètre minimum des branches récoltées (Figure 6). On observe que la composition forestière (peuplement pur ou mixte) a peu d'effet sur la récolte de biomasse, mais que la récolte de biomasse est plus grande par CJ que par CDL. Cela s'explique par le fait que dans les CDL, ce sont les arbres de plus gros diamètres qui sont récoltés. Comme la relation surface terrière-biomasse tend à plafonner à mesure que le DHP augmente, il est normal que la biomasse récoltée soit plus grande après CJ qu'après CDL.

En termes absolus, on remarque que le calcium et l'azote sont les éléments qui sont exportés en plus grandes quantités, suivis du potassium, puis du magnésium, du phosphore et du sodium; l'aluminium est quant à lui très peu abondant (Figure 6). Dans le cas du calcium, on voit que l'exportation est environ 300% plus grande avec récolte des arbres entiers qu'avec récolte des troncs (jusqu'à 10 cm); si on compare la récolte jusqu'à un diamètre de 5 cm à la récolte des troncs seulement, l'augmentation d'exportation est tout de même de 50%. Le magnésium, le potassium et le phosphore présentent des profils semblables au calcium en fonction des modes de récolte, mais les quantités exportées sont moindres.

Pour tous les éléments nutritifs, les analyses statistiques (Tableau 8) démontrent que la meilleure façon de prédire la quantité d'éléments exportés est d'utiliser les 3 variables : mode de récolte, type de coupe partielle et composition. Quand on retire le mode de récolte du modèle statistique, la performance du modèle chute abruptement, beaucoup plus que quand on retire une des deux autres variables. Ceci démontre donc que la variable la plus importante dans le modèle est définitivement le mode de récolte. Cela est d'ailleurs bien illustré pour chacun des éléments à la Figure 6, bien que ce soit moins évident pour l'aluminium. Alors que pour la plupart des éléments, la quantité exportée suit celle de la biomasse exportée, le sodium diffère des autres éléments puisqu'on observe une chute brutale de l'exportation quand on ne retire pas les branches < 10 cm. Cela s'explique comme on l'a vu plutôt par une grande concentration de sodium dans le compartiment des branches de 5-10 cm.

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Tableau 8: Comparaison des AIC obtenus par les divers modèles pour les éléments analysés à l'échelle du peuplement

Modèle	Al	Ca	K	Mg	N	Na	P
Mode*CP*Compo	-139 287	110 823	78 617	20 455	110 523	16 951	25 528
Mode*CP	-125 120	137 148	93 839	37 219	115 680	18 221	35 248
Mode*Compo	-101 998	113 633	83 290	23 378	127 979	20 128	32 004
CP*Compo	-56 753	163 342	126 249	81 303	169 897	56 193	77 439

Mode : Mode de récolte; CP :Type de coupe partielle; Compo : Type de composition; voir méthodologie pour les détails. Interprétation : moins l'AIC est élevé pour un élément donné, plus le modèle est performant; l'AIC en gras indique le meilleur modèle parmi les modèles à 2 variables.

En comparant les modèles mode de récolte*composition et mode de récolte*type de coupe partielle, on est à même de comprendre l'importance relative des autres variables étudiées. Pour certains éléments (Al, N, Na), la performance du modèle récolte*type de coupe partielle est supérieure alors que pour d'autres variables (Ca, K, Mg, P), c'est le modèle de récolte*composition. Ces résultats sont directement en lien avec ceux de la section précédente. En effet, pour le premier groupe d'éléments, cela signifie que la répartition (en quantité) des éléments diffère davantage en fonction du DHP de la tige que de son essence. Pour le second groupe d'éléments, cela signifie que la répartition est davantage influencée par l'essence que par le DHP de la tige. Ainsi, pour le calcium et le potassium, il y a une plus grande exportation d'éléments lorsque les traitements sont effectués dans des peuplements purs d'érable à sucre que dans des peuplements mixtes (ERS-BOJ). Pour le potassium, l'exportation est plus grande dans les peuplements mixtes seulement pour le mode de récolte par arbre entier; cela reflète la grande quantité de cet élément dans le bois raméal du bouleau jaune. Pour le magnésium, les peuplements purs entraînent une plus grande exportation que dans les peuplements mixtes selon tous les modes de récolte, sauf la récolte par arbre entier; cela s'explique par des quantités de cet élément diamétralement opposés dans les compartiments des deux essences étudiées. Les différences d'exportation entre CJ et CDL sont plutôt faibles et ont tendance à suivre ce que l'on observe pour la biomasse : plus d'exportation avec CJ que CDL. Cela n'est toutefois pas observé pour le calcium, car on retrouve une plus grande quantité de cet élément dans les troncs. Or, la CDL en favorisant la récolte de plus gros diamètre favorise, par rapport à la CJ, une plus grande récolte du compartiment « tronc » à l'échelle du peuplement.

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

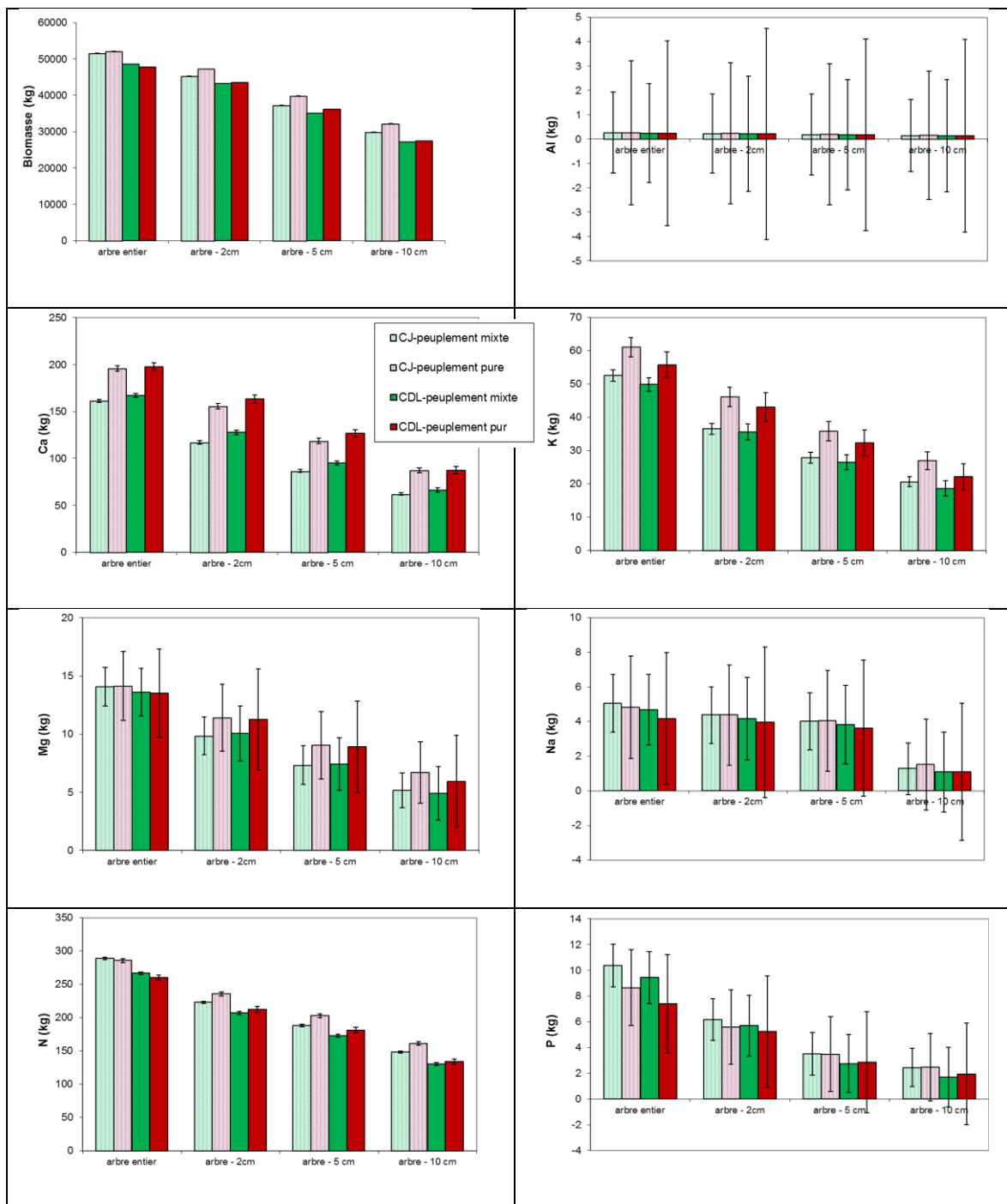


Figure 6 : Quantité moyenne de biomasse et de nutriments (kg/ha) exportée en fonction des divers modes de récolte et du type de coupe partielle pour des peuplements virtuels pur et mixtes (voir tableaux 5 et 6). Arbre entier : L'ensemble de l'arbre est exporté du site; Arbre – 2 cm : L'ensemble de l'arbre est exporté du site, sauf les branches de moins de 2 cm de diamètre; Arbre – 5 cm : L'ensemble de l'arbre est exporté du site, sauf les branches de moins de 5 cm de diamètre; Arbre -10 cm : L'ensemble de l'arbre est exporté du site, sauf les branches de moins de 10 cm de diamètre. CJ : Coupe de jardinage; CDL : Coupe à diamètre limite. Peuplement pur : peuplement composé à 100 % d'érable à sucre; Peuplement mixte : Peuplement composé à 50% d'érable à sucre et 50 % de bouleau jaune. Les barres d'erreur indiquent les écart-types sur 1000 peuplements. Se référer à la méthodologie pour plus de précisions.

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

En résumé, bien que l'on observe des effets des différentes variables étudiées, il demeure que la quantité d'éléments exportés s'explique en grande partie par la quantité de biomasse exportée. Cela est bien exprimé à la Figure 7, où on peut distinguer les effets de la biomasse récoltée, du mode de récolte, du type de coupe partielle et de la composition forestière sur la quantité de Ca exportée. Des figures semblables pour les autres éléments sont présentes à l'Annexe 4.

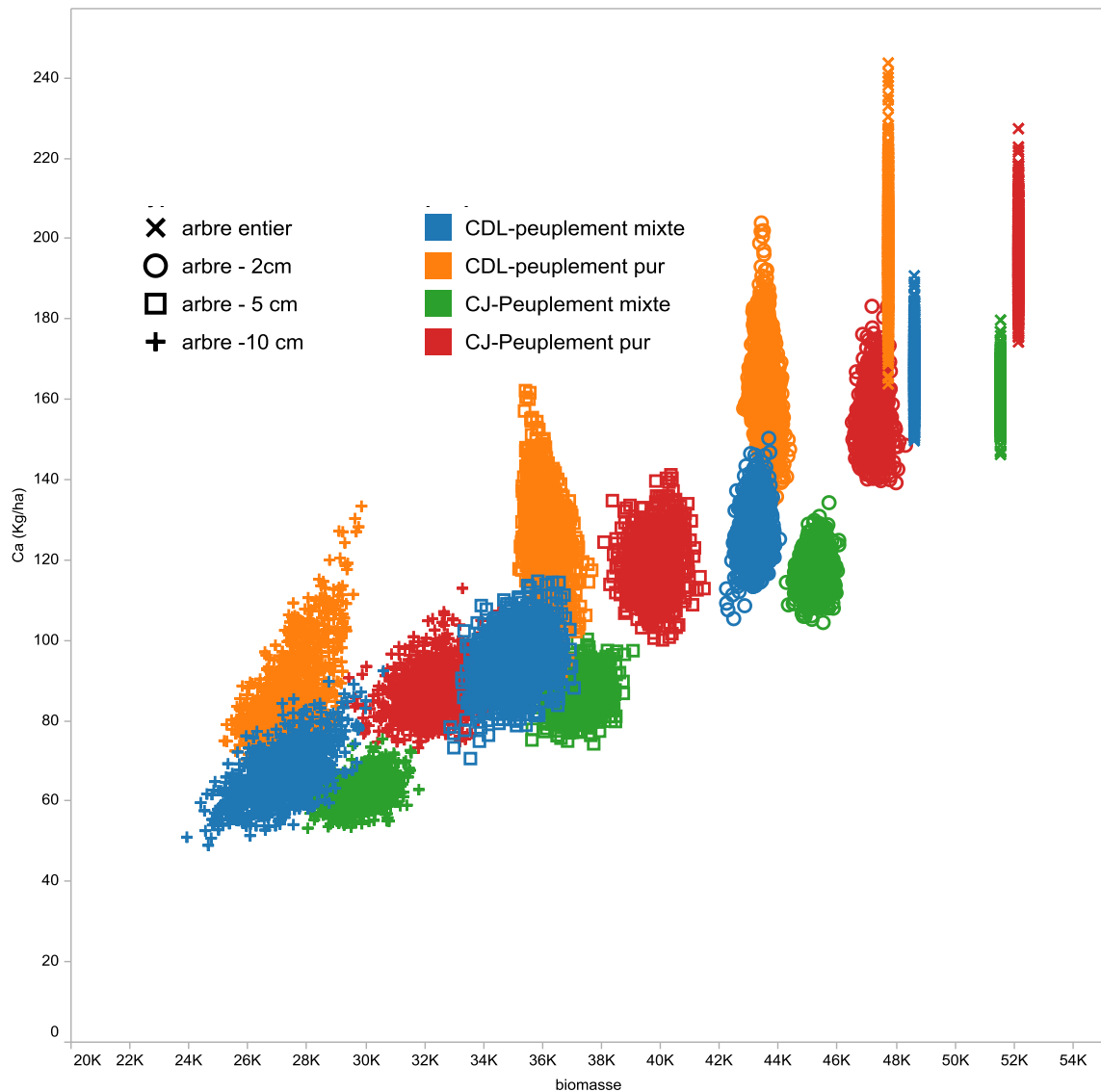


Figure 7. Quantité de Ca exportée en fonction de la biomasse exportée, du mode récolte, du type de récolte et de la composition du peuplement. Voir Figure 6 et la méthodologie pour plus de détails.

Discussion

Échelle de l'individu

Disponibilité des éléments dans le sol forestier et leur rôle dans l'arbre

Dans l'érablière à bouleau jaune, il existe une large diversité de sols du fait de la diversité de leur origine et de leur couvert. Cependant, les sols forestiers du sud du Québec possèdent généralement un contenu minéral considéré modéré à riche (Brady, 1974). Les cendres de ces sols sont caractéristiques car elles sont dominées par l'N et le Ca et peuvent localement posséder des teneurs assez élevées en Si (Silice), Al et/ou Fe (Larcher, 1995). Comparativement aux sols boréaux, le taux de décomposition de la litière est rapide et le profil de sol possède 4 horizons principaux (i.e. : O [organique], A [mélange de matière organique et minéral], B [minéral] et C [roche mère]). Dans ces sols, la facilité d'absorption des éléments nutritifs par les arbres décroît dans l'ordre suivant : $Al \geq P > Ca \geq Mg > N > K \geq Na$ (cf. Larcher, 1995). En terme de disponibilité dans les horizons A et B, celles de l'Al, du Ca et du K est habituellement élevée (15 à 50 g.kg⁻¹ de sol), alors le Mg, l'N et le Na y sont 10 fois moins présents (1.5 à 5 g.kg⁻¹) et le P jusqu'à 30 fois moins présent (0.8 g.kg⁻¹) (Larcher, 1995). Cependant, il existe de nombreux facteurs qui influenceront la disponibilité locale et effective de ces éléments pour les arbres. Par exemple, la teneur en eau du sol, le pH, l'équilibre entre les concentrations d'éléments et la présence de matière organique à laquelle les ions se lient peuvent largement affecter les capacités d'absorption et la disponibilité du pool échangeable des éléments nutritifs.

Au sein de l'arbre, l'N est un élément indispensable puisqu'il entre dans la composition des parois cellulaires et de la quasi-totalité des molécules impliquées dans le fonctionnement physiologique et le métabolisme. Son transport dans l'arbre est bon et se fait sur de longues distances par des liaisons avec des composés organiques véhiculés dans le xylème et le phloème. Le P est également primordial dans l'arbre puisque qu'il est au central dans les molécules énergétiques nécessaires au métabolisme. Comme l'N il est facilement transporté sur de longues distances en étant lié à d'autres composants et il est aussi extrêmement recyclé et réutilisé au sein des plantes. Le K est un élément qui doit être présent en quantité importante dans l'arbre puisqu'il est responsable de la régulation osmotique et permet les échanges d'ions entre les cellules. Son transport se fait très bien même sans liaison. Le Mg est primordial pour le fonctionnement des feuilles (chlorophylle, enzymes foliaires, ...) et c'est là qu'il s'accumule. Sa

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

capacité de transport est moyenne puisqu'il est souvent intimement lié à des composés organiques de grande taille. Le Ca représente un élément important car il est impliqué dans la régulation du métabolisme et de la croissance (division cellulaire) et agit comme activateur d'enzymes. Son transport dans la plante est mauvais et il s'accumule donc facilement dans les zones de forte activité (feuilles et cambium. Une bonne quantité de Ca est donc généralement perdu pour l'arbre chaque année au moment de la chute des feuilles. L'Al et le Na ne possèdent à proprement parler de fonctions dans l'arbre et agissent plutôt comme des antagonismes au transport ou à l'échange du Ca et du K. Comme ils ne sont pas utilisés par les plantes, ceux-ci peuvent se concentrer dans certains tissus et empêcher leur bon fonctionnement. Un excès d'Al ou de Na dans le sol peut rapidement mener à un dysfonctionnement de l'arbre et même à sa mort.

Saisonnalité et retranslocation des éléments nutritifs

Il est important de comprendre qu'il existe une grande saisonnalité dans la répartition et la concentration de certains éléments nutritifs dans l'arbre (Wang et al., 2003). Ainsi, la saison à laquelle les mesures sont prises peut grandement affecter les résultats et les interprétations concernant le retrait d'éléments nutritifs par retrait de biomasse ligneuse. Ceci vient du fait du rôle des éléments, et donc de leur site d'accumulation, et de leur mobilité (capacité de transport) dans l'arbre. Les éléments tels que le P, l'N et le K qui sont intimement reliés au métabolisme s'accumulent dans les zones de forte activité et cela d'autant plus que la croissance de l'individu est bonne (Lambers et al., 2008). Cependant, leur bonne mobilité (en particulier pour l'N et le P, fait en sorte qu'ils sont « recyclés » (ou retransloqués) dans les tissus pérennes avant la chute des feuilles. Ainsi de 30 à 80% des éléments accumulés dans les feuilles peuvent être réutilisables (Chapin and Kedrowski, 1983; Fife et al., 2008). À l'inverse, le Ca, mobile dans le xylème (racines vers feuilles) mais immobile dans le phloème (feuilles vers racines) s'accumule dans les zones d'activité cellulaire mais n'est pas retransloqué à la chute des feuilles (Lambers et al., 2008; Fife et al., 2008). Seul le Ca utilisé et contenu dans les tissus ligneux demeure donc dans l'arbre à l'automne. Le Mg possède une situation intermédiaire, où comme le Ca il s'accumule principalement dans les feuilles incorporé dans la chlorophylle et les activateurs d'enzymes. Cependant, la partie plus mobile contenant cet élément (i.e. les activateurs d'enzymes) peut être retransloquée lorsque le métabolisme ralenti avant la chute des feuilles (Larcher, 1995; Lambers et al., 2008).

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Plusieurs facteurs interagissent avec cette variation saisonnière de concentration en éléments nutritifs : L'environnement, s'il est limitant ou propice à la croissance, l'espèce (principalement via des différences d'allocation et des différences d'adaptation à l'environnement), l'âge et le stade de développement (Niklas et al., 2005; Fife et al., 2008; Lambers et al., 2008)

Les éléments nutritifs chez l'érable à sucre et le bouleau jaune

En considérant la section précédente, il est difficile de ne pas interpréter la distribution des éléments nutritifs séparément. En effet, les variations importantes de leur disponibilité (potentielle) dans le sol, de leur teneur, de leur distribution et de leur mobilité dans l'arbre en font chacun des cas particuliers. De plus, il est évident que la saisonnalité peut influencer la quantité de certains éléments dans les compartiments des arbres mais l'impact de la saison de récolte sur le retrait d'un élément dans le peuplement reste difficile à quantifier puisque cela dépendra d'autres facteurs comme (i) le pool existant de l'élément dans le sol, (ii) la disponibilité pour l'arbre de l'élément dans son pool et (iii) le cycle de l'élément, sa minéralisation et ses apports extérieurs.

Cependant, avec l'objectif de quantifier la perte d'éléments nutritifs suivant l'espèce, son DHP et le diamètre fin bout qui est retiré, il est possible de dresser les conclusions suivantes :

De façon générale, l'augmentation du DHP est la principale source d'augmentation de la quantité d'éléments nutritifs puisqu'il signifie une augmentation de la biomasse sèche totale et donc des éléments. Les différences entre espèces ou avec l'âge (visible dans la concentration des éléments) tendent donc à s'effacer lorsque l'on parle de quantité d'éléments nutritifs, et laissent la place aux différences entre espèces associées à la répartition de biomasse sèche dans les compartiments.

Échelle du peuplement

Les quantités d'éléments exportés suite à la récolte par arbre entier sont dans les mêmes ordres de grandeur que celles observées dans d'autres études menées dans des forêts feuillues du nord-est américain (Federer et al., 1989; Yanai, 1998). Par exemple, Federer et al. (1989) rapportent des valeurs de 200 à 1290 kg/ha de calcium dans la partie aérienne des six forêts qu'ils ont étudiées. Dans le cas de la présente étude, on évalue cette valeur à environ 650 kg/ha pour les érablières pures (peuplement-type pur, Tableau 5). Pour le phosphore, Yanai (1998) évalue la portion aérienne à 52 kg/ha ; nous évaluons cette valeur à environ 33 kg/ha.

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Une des particularités de notre étude est de permettre de quantifier d'exportation supplémentaire d'éléments nutritifs suite à différents modes de la récolte de la biomasse. Nos résultats montrent clairement que plus on récolte de biomasse, plus d'éléments nutritifs sont exportés. De manière générale, on remarque que l'exportation du calcium, du potassium, du magnésium et du phosphore est triplée par une récolte par arbre entier par rapport à une récolte du tronc seulement, doubler si les branches <2 cm sont laissées sur le site et multiplier par 1.5 si les branches <5 cm sont laissées sur le site. La question est de savoir si ces exportations supplémentaires sont importantes pour le fonctionnement et la productivité de l'écosystème. Puisque nous n'avons pas mesurés les pools de ces éléments dans le sol et encore moins leurs cycles de renouvellement, nous ne pouvons répondre directement à cette question.

Dans le cas du calcium, les deux principales études (Federer et al., 1989; Yanai, 1998) menées sur le sujet s'entendent : il y a présentement davantage de extrins de cet élément que d'intrans. La récolte forestière ne vient qu'aggraver le problème. Yanai (1998) explique que les déséquilibres intrans-extrins sont probablement dues aux précipitations acides qui provoquent un lessivage du calcium. Elle ajoute que sans les précipitations acides, le cycle du calcium serait probablement en équilibre. Dans le cas du phosphore, Federer et al. (1989) montrent que la portion aérienne par rapport à l'ensemble de l'écosystème est d'environ 2%. cela peut sembler très peu ; Toutefois Yanai (1998) indique que si on ne considère que le phosphore directement accessible aux plantes dans l'écosystème, c'est 32% de cet élément qui se trouve dans la partie aérienne. Il demeure donc possible que l'exportation du phosphore soit problématique pour le fonctionnement de l'écosystème.

Ainsi, si l'on revient à la question initiale à savoir si l'exportation supplémentaire de nutriments par la récolte de biomasse est dommageable pour le fonctionnement et la productivité de l'écosystème, nous devons répondre, à partir de nos résultats et la littérature, que la récolte de biomasse ne peut qu'exacerber un problème anticipé. À titre d'exemple, Federer et al. (1989) rapportent que l'input en calcium dans un écosystème est d'environ 1 kg/ha/an ; une coupe de jardinage dans un peuplement pur d'érable à sucre mène à une exportation de 87 kg/ha pour une récolte des troncs seulement et 195 kg/ha pour une récolte par arbre entier.

Il est important de mentionner que les quantités d'éléments exportés ne considèrent que les exportations immédiates ; il peut y avoir une exportation différée suite au lessivage. De plus, cette exportation due au lessivage n'est pas la même en fonction des éléments. Par exemple le

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

potassium est beaucoup plus facilement lessivé que le magnésium et le calcium parce qu'il n'est pas incorporé à des grosses molécules organiques et parce qu'il est moins bien attaché aux colloïdes du sol en raison de sa monovalence (Ca et Mg étant bivalents) (Thiffault et al., 2011).

Dans le cadre de cette étude, nous avons quantifié l'exportation de nutriments quand la récolte a lieu après la chute des feuilles. Les quantités observées auraient pu être sensiblement différentes si les arbres avaient été récoltés l'été. Par exemple, d'après Yanai (1998), c'est environ 4% du calcium de l'arbre qui se retrouve dans les feuilles. De toute évidence, ce calcium n'est pas retourné dans les tissus à l'automne (Larcher 1995). Ainsi, le pire mode de récolte pour le calcium serait l'exportation des cimes avec les feuilles (en été). Toujours d'après Yanai (1998), le phosphore, l'azote et le calcium dans les feuilles représentent entre 12 et 15% de ce l'on retrouve dans les arbres. Dans le cas de ces éléments, la translocation est très efficace (Larcher 1995) de telle sorte qu'à la chute des feuilles, ces éléments sont réincorporés dans les tissus. Ainsi, de faibles différences d'exportation sont anticipés entre une coupe d'été et d'hiver pour ces éléments.

Les effets des types de coupe partielle et de la composition forestière sur l'exportation d'éléments sont relativement faibles. En fait, les différences que l'on observe à l'échelle de l'arbre entre les espèces/compartiments sont souvent noyées à l'échelle du peuplement. Il serait probablement plus intéressant d'optimiser (minimiser) l'exportation d'éléments spécifiques. Par exemple pour la récolte d'une surface terrière et d'une biomasse données dans un peuplement d'une composition et structure données, il serait intéressant de développer des directives de récolte qui permettent de minimiser l'exportation du phosphore ou du calcium. Probablement que les directives optimisées seraient très différentes pour ces deux éléments.

Conclusion

Nous avons pu quantifier dans cette étude comment les principaux éléments nutritifs se concentrent dans les différents compartiments pour 2 essences, l'érable à sucre et le bouleau jaune. Il apparaît clairement qu'il existe des différences importantes entre espèces en ce qui concerne leur concentration totale (ou par compartiment) en nutriment. En effet, pour un même DHP, l'érable accumule plus de calcium et potassium alors que le bouleau accumule plus de phosphore dans sa cime. Cependant, en termes de variabilité de la quantité d'éléments nutritifs dans l'arbre, il apparaît que la répartition de la biomasse sèche dans les compartiments est plus importante que la concentration en élément. Ainsi les différences entre espèces qui demeurent visibles en quantité d'éléments nutritifs sont souvent plus reliées aux patrons spécifiques d'allocation de biomasse dans les différents compartiments (i.e. BOJ plus de cime et ERS plus de tronc). Il est important de noter qu'à l'échelle de l'arbre, la saison du retrait de la biomasse pourrait avoir un impact sur certains éléments qui sont plus recyclés que d'autres par l'arbre. Cependant, l'impact négatif de la saison de récolte sur le retrait d'un élément dépendra énormément de facteurs supplémentaires que sont le pool de cet élément dans le sol, la disponibilité de l'élément dans ce pool et le cycle de cet élément avec ces apports externes.

L'exercice de modélisation réalisé afin d'évaluer l'effet de divers modes de récolte et de 2 types de coupe partielle sur l'exportation d'éléments, et ce, en fonction de deux types de composition de peuplement. Les résultats sont clairs : plus on récolte de biomasse, plus on récolte d'éléments nutritifs. Les effets du type de coupe partielle (CJ ou CDL) et de la composition des peuplements sont relativement faibles. **En nous basant sur nos résultats et sur la littérature, nous sommes d'avis, dans l'état actuel des connaissances, qu'il est risqué pour le fonctionnement et la productivité des écosystèmes de permettre la récolte de la biomasse forestière en forêt feuillue.**

Afin de quantifier ce risque, il nous apparaît primordial de compléter la présente étude en quantifiant les pools des différents éléments et en quantifiant leurs cycles bio-géochimiques afin de connaître les intrans-extrans naturels de ces éléments dans les écosystèmes forestiers de nos régions.

CHAPITRE 2 : MISE EN PLACE D'UN DISPOSITIF DE SUIVI SUR LA BIODIVERSITE

Introduction

Alors que le précédent chapitre s'attardait sur les effets potentiels de la récolte de la biomasse forestière sur l'exportation des nutriments ; le présent chapitre fait état de la mise en place d'un dispositif de suivi à long terme des effets de la récolte de la biomasse forestière sur la biodiversité floristique et faunique.

La perte de microhabitats, de couvert de protection et cachette dus au prélèvement des cimes est souvent citée comme principale problématique quant aux effets de la récolte de biomasse sur la biodiversité. Cela s'explique par le fait que les amas de cimes et de branches au sol représentent des microhabitats et une ressource trophique pour les vertébrés tels que les petits rongeurs vulnérables à la prédation (Berg et al., 1994; Ecke et al., 2002; Hacker, 2005; Landmann et al., 2009) ainsi que les amphibiens (Hagan and Grove, 1999). L'importance des débris ligneux en forêt est connue pour l'herpétofaune ; la proportion de certaines espèces (ex : salamandre rayée) augmentant avec l'augmentation du volume de débris ligneux au sol (Bonin et al., 1999). Plusieurs espèces de couleuvres (ex. : couleuvre à ventre rouge, verte, à collier, rayée) et de salamandres peuvent utiliser les débris ligneux comme abri (Desroches and Rodrigue, 2004). Ceux-ci peuvent aussi être des sites d'enfouissement lors de l'hibernation (ex. : rainette crucifère, rainette faux-grillon, grenouille des bois). Lors de période sèche, les amas de débris au sol peuvent servir de micro-habitat plus humide (Heatwole, 1962). Ces débris sont également importants pour les petits mammifères, particulièrement selon leur état de décomposition. Dans les paysages aménagés, par exemple, il existe une relation positive entre l'abondance du campagnol à dos roux et les débris ligneux au sol. L'abondance de la souris sylvestre a aussi été corrélée avec la disponibilité de débris ligneux au sol (> 10 cm) (Etcheverry et al., 2005).

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 et al., 2009). Les effets indirects de la récolte de la biomasse, comme la diminution du pH des sols, peuvent diminuer la richesse des espèces d'amphibiens (Wyman and Jancola, 1992). L'établissement des semis et des gaules d'espèces forestières est dépendant des conditions microclimatiques et des sites (températures, humidité, nutriments). La récolte de la

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

biomasse forestière, lors de coupe totale, a été démontrée comme défavorable pour les bryophytes forestière, mais défavorable pour les plantes vasculaires (Åström et al., 2005). Une autre étude observe que le maintien de cimes est défavorable à la richesse de la flore vasculaire (Deconchat and Balent, 2001).

Le suivi du dispositif présenté dans ce chapitre permettra de quantifier les effets de différents modes de récolte de biomasse forestière sur la biodiversité floristique et faunique de la forêt feuillue de l'ouest du Québec.

Territoire et méthodologie

Description de la zone d'étude

Le dispositif d'étude sur l'effet de la récolte de biomasse intégrée à la coupe partielle sur la biodiversité a été mis en place dans des zones appartenant au domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune de l'ouest. La moitié des zones d'études est située dans les Laurentides et l'autre moitié en Outaouais. Le territoire de la Réserve faunique Papineau-Labelle avec plus de 162 000 ha et ces environs chevauche les deux régions à l'étude et se situe dans l'érablière à bouleau jaune. Les sites d'études sélectionnées se trouvent dans le domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune, à l'intérieur ou près de la réserve faunique Papineau-Labelle (voir Figure 8). Deux unités de paysage définies par Robitaille et Saucier (1998) se retrouvent notamment dans les sites d'études, soit celles du Lac Poisson Blanc (22) et du Lac Simon (23). Ceux-ci sont caractérisés principalement, d'une part, par des tills minces (44% et 43%) et des affleurement rocheux (20%, et 13%) et, d'autre part, des dépôts fluvioglaciers (16% et 18%). En se référant aux paysages qui se retrouvent dans la réserve faunique Papineau-Labelle, on estime que la longueur de la saison de croissance est d'environ 180 jours, la température annuelle moyenne varie de 2,5 à 5 °C et que le nombre de degré-jours croissance varie de 2600 à 3000 °C (Robitaille and Saucier, 1998).

Dispositif expérimental

Sélection des sites

Pour la mise en place d'un dispositif de suivi, la prise de mesure et l'analyse des effets sur la biodiversité, quatre sites d'études ont été installés. Ces sites permettent de mener à bien la comparaison des zones traités et des zones non-traités, ainsi que le suivi avant-après contrôle-impact. De plus les sites devaient être à plus de 1 km de distances afin d'éviter une interdépendance des mesures.

Dans chacun des différents sites, 5 parcelles sont délimitées. Des coupes partielles (coupe de jardinage) selon différents modes de récolte de la biomasse ont été effectuées à l'automne 2011/hiver 2012 dans 3 des 5 parcelles. Les 2 autres parcelles serviront de témoins et de traitements alternatifs. Les divisions de l'arbre en compartiments plus susceptibles d'être retirés lors des interventions ont été appliquées afin de simuler la récolte de la biomasse

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

intégrée à la coupe de jardinage, soit les grosses branches (entre 10 et 5cm de diamètre), les branches moyennes (entre 5 et 2cm de diamètre) et l'ensemble de la cime.

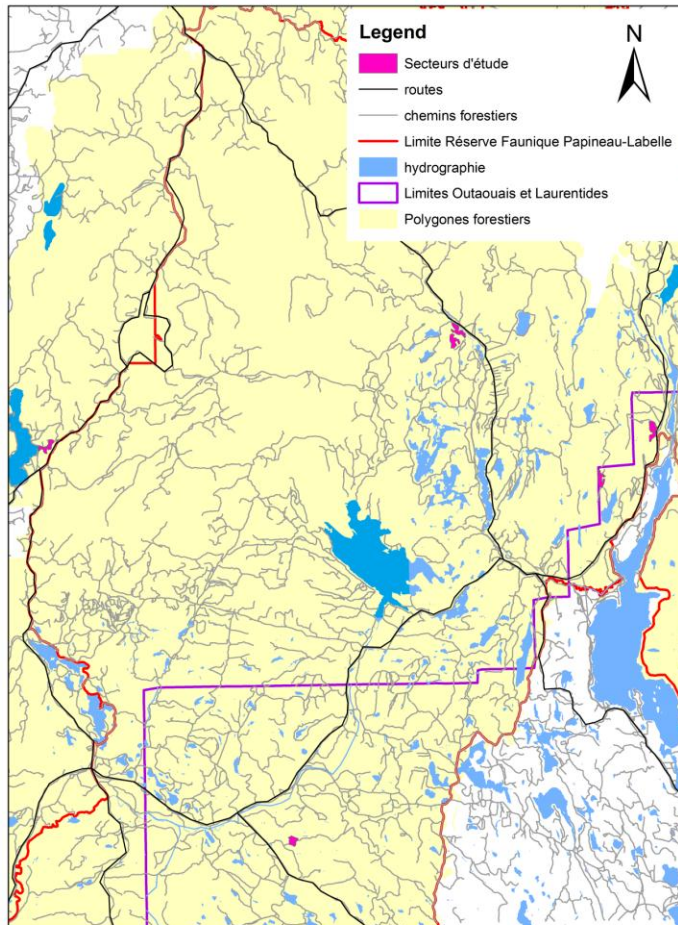


Figure 8: Localisation des différents sites d'études pour l'étude de la biodiversité.

Mise en place du dispositif de suivi

Dans chaque site, 5 parcelles de 1 ha, séparées de plus de 100m ont été échantillonnées (Tableau 9). Dans chaque parcelle, un dispositif d'échantillonnage systématique (Bleu, Figure 9) ainsi qu'un dispositif d'échantillonnage non-aléatoire de microsites (Jaune, Figure 9) sont présents. Le dispositif d'échantillonnage non-aléatoire de microsites, est positionné après une recherche terrain de forte présence de branches et de cimes. Nous avons recherché des sites où le volume de débris ligneux au sol à l'hectare est semblable avant traitement. Le contour des parcelles de 100m par 100m a été délimité et gradué tous les 25 mètres.

Tableau 9: Les différents traitements et les superficies échantillonnées.

Traitement	Nombre de sites/réplicas	Taille d'une parcelle	Superficie échantillonnée
Témoin non-traité	4	1 ha	4 ha
CJ + récolte grosse branches	4	1 ha	4 ha
CJ + récolte moyennes branches	4	1 ha	4 ha
CJ + récolte cimes	4	1 ha	4 ha
Traitement alternatif	4	1ha	4 ha

Les placettes de végétation

Les placettes de végétation ont permis de prendre des mesures des peuplements forestiers (1), de la régénération forestière (2) et du cortège floristique (3), ainsi que de faire le suivi à moyen et/ou long terme.

Neuf placettes circulaires de 1.26m de rayon (5m²) sont disposées dans chaque parcelle. La Figure 9 représente la disposition de ces placettes soit (25m à l'est et 25m au nord du point 0,

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

50m à l'est et 25m au nord du point 0, 75m à l'est et 25m au nord du point 0, 25m à l'est et 50m au nord du point 0, 50m à l'est et 50m au nord du point 0, 75m à l'est et 50m au nord du point 0, 25m à l'est et 75m au nord du point 0, 50m à l'est et 75m au nord du point 0, 75m à l'est et 75m au nord du point 0). Des étiquettes métalliques ont été placées au sol afin de repérer le centre des placettes de végétation.

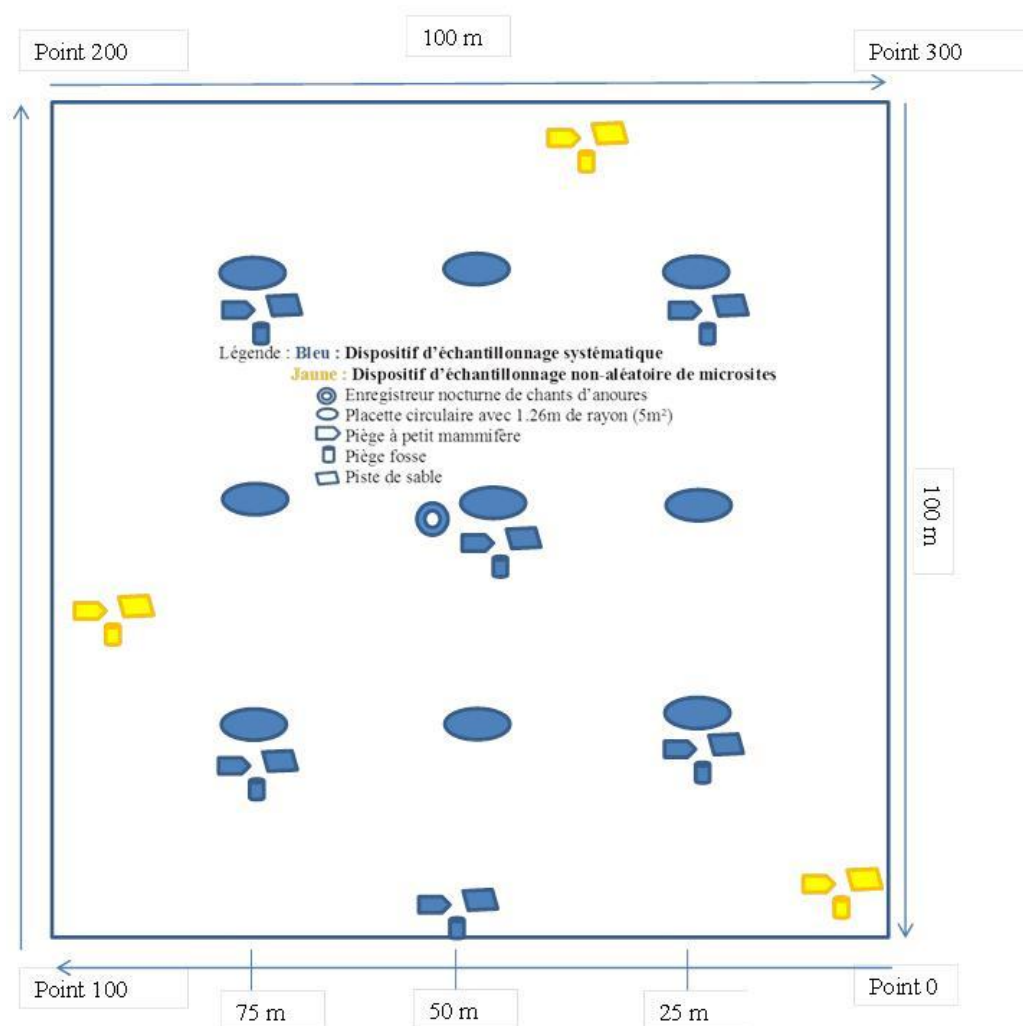


Figure 9 : Dispositif d'échantillonnage pour une parcelle de 1 ha.

Les zones d'observations de l'herpétofaune

Les points gps des observations de salamandres et tritons (4) ont été répertoriés, ainsi que ceux pour l'écoute des chants nocturnes de l'herpétofaune (5).

Les microsites

Les microsites avec les pistes de sables, les pièges à petits mammifères et les pièges fosses ont aussi été marqués afin de faciliter la remesure pour les petits mammifères. Finalement le dispositif d'échantillonnage systématique représenté ci-dessous a été appliqué dans chacune des parcelles afin de faciliter la remesure. Les points gps des sites d'échantillonnage non-aléatoire ont aussi été répertoriés.

Établissement des traitements

Les traitements sont assignés aléatoirement dans les différents sites d'étude. La coupe a été faite selon les divers traitements assignés à l'automne 2011/hiver 2012.

Prise de mesure

Les placettes de végétation

La biodiversité du cortège floristique, des peuplements forestiers et de la régénération forestière a été inventoriée dans chaque parcelle à l'aide de 9 placettes circulaire de 5m² positionnées selon la Figure 9.

Les peuplements forestiers

L'espèce et la classe de taille des arbres (perches 10-20cm, moyen fût 20-40 cm, grand fût 40-60 cm et très grand fût plus de 60 cm) sont notées pour tous les arbres qui entrent dans un point de prisme de facteur 2 effectué au centre de chaque placette de végétation. Ces données servent aussi à calculer la surface terrière.

La régénération forestière

Pour évaluer l'état de la régénération, les semis et les gaules d'espèces ligneuses sont dénombrés par espèce et par classes de taille (plantule, semis et gaules). Les classes de taille sont la plantule (moins de 50 cm), le semis (entre 50 et 300 cm) et la gaule (plus de 300 cm, mais de moins de 9.1 cm au DHP).

Le cortège floristique

Les bryophytes sont identifié par famille, tandis que l'identification des fougères, prêles et lycopode se fait à l'espèce lorsque possible (sans analyse d'ADN). Toutes les autres plantes

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

vasculaires ont été identifiées à l'espèce si possible. L'occurrence des différentes espèces, ainsi que l'estimation de la densité par placettes ont été notées.

Les mesures de l'herpétofaune

Pour l'herpétofaune, plusieurs méthodes ont été mises en place, tenant compte des différentes espèces d'urodèles (salamandres et triton), de couleuvres et d'anoures (rainette, grenouille) que l'on retrouve dans nos zones d'études. L'inventaire a été fait principalement par des recherches actives et standardisées sur le terrain (par quadrat), ainsi que par l'enregistrement des chants de reproduction pour les anoures.

Les salamandres et tritons

Les inventaires standardisés s'effectuent durant la journée et consiste à retourner les pierres, les troncs renversés ainsi que les débris ligneux au sol tels que bûches, branches et écorces (Galois and Ouellet, 2005). Les recherches durent 2 heures pour 2 personnes dans chaque parcelles, pour un totale d'environ 40 heures de recherche.

Tous les éléments sont replacés dans leur position initiale. Chaque animal capturé est identifié, mesuré à l'aide d'une règle ($\pm 0,1$ mm) et quelquefois photographié avant d'être relâché sur place. Les œufs et les exuvies de certaines espèces permettent aussi l'identification (Ouellet et al., 2004). Le microhabitat de capture est déterminé et géoréférencé.

D'autres espèces de l'herpétofaune

L'écoute des chants de reproduction des anoures a été fait entre le 20 mai et le 15 juin afin de couvrir le plus d'espèces possible (Desroches and Rodrigue, 2004). Une enregistreuse a été installée au centre de la parcelle et a enregistré les chants durant 1 heure chaque nuit, pendant 4 nuits (Figure C). Les espèces entendues ont ensuite été notées. Pour estimer l'abondance relative des espèces, les cotes suivantes sont attribuées: 0 = aucun individu entendu, 1 = quelques individus pouvant être comptés séparément, 2 = quelques individus avec chevauchement de coassements et 3 = chorale avec des coassements non dénombrables.

Les petits mammifères

La technique capture/re-capture avec des pièges à petits mammifères (par parcelle : 6 pour le dispositif systématique et 3 pour le dispositif aléatoire), ainsi que des pièges fosses (par parcelles : 6 pour le dispositif systématique et 3 pour le dispositif aléatoire) sont utilisée pour

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

évaluer la diversité des petits mammifères (Figure 9). Chaque animal est identifié à l'espèce, marqué (coupe de poil) et relâché. Le microhabitat de capture a été déterminé et géoréférencé. Des pistes de sables ont été installées (par parcelles : 6 pour le dispositif systématique et 3 pour le dispositif aléatoire), afin d'avoir un indice de la diversité et de l'abondance (Figure 9). Les traces servent à l'identification de l'espèce et le nombre de passage est dénombré. Au totale 8 relevés ont été faits pour chaque cage et piste de sable pour tous les microsites, soit 4 le matin et 4 le soir.

Résultats

Les peuplements forestiers

La surface terrière des peuplements forestiers dans différentes placettes est présentée au Tableau 10. Les essences et classes de tailles de ces arbres sont aussi disponibles.

Tableau 10: La surface terrière avant traitement dans les diverses placettes permanentes.

Placette	Laurentides 1					Outaouais 1				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	10	24	20	30	16	16	24	32	8	20
2	14	24	4	30	22	16	20	30	16	26
3	20	18	22	26	22	24	28	16	30	30
4	16	24	24	18	20	22	20	12	10	44
5	20	12	18	24	22	16	28	24	18	18
6	12	36	28	22	20	22	18	26	24	20
7	26	36	18	28	18	14	26	30	16	32
8	24	30	14	16	26	22	26	18	22	28
9	24	24	26	28	18	24	14	30	22	22

Placette	Outaouais 2					Laurentides 2				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	26	28	37	24	26	20	28	24	30	26
2	26	28	34	20	20	24	32	26	26	22
3	24	32	22	24	20	24	24	28	36	26
4	28	28	31	20	22	20	30	24	26	24
5	28	14	30	16	10	20	40	24	28	32
6	26	26	34	18	18	12	28	28	24	38
7	30	34	25	16	36	22	24	36	26	40
8	24	24	20	6	22	16	26	26	30	28
9	32	22	28	22	14	18	28	30	40	14

La régénération forestière et le cortège floristique

Les données ont été prise avant traitement, soit un inventaire détaillé et de la régénération et du cortège floristique à l'aide de placettes et parcelles permanentes dument identifiés. Ces résultats présentent entre autre un portrait de la densité par espèce et taille de la régénération forestière avant traitement, ainsi que de la densité des différentes espèces floristiques présentes.

La densité de plus de 70 espèces a été mesurée dans les placettes à l'étude. En somme 112 5-m² de végétation ont été analysés pour le cortège floristique et la régénération forestière. Les résultats de la densité des 70 espèces les plus fréquentes (Tableau 11) sont disponibles pour chaque placette et permettront de faire des comparaisons après remesure dans les mêmes

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

placettes. Vu la quantité importante de résultats, ceux-ci ne sont pas représentés dans le présent rapport, mais les données sont soigneusement conservées pour les analyses futures après remesures. Ces résultats permettront de faire une comparaison temporelle dans les parcelles témoins et traités. Entre autre, les effets de la récolte intégrée de la biomasse en termes d'augmentation et de diminutions significatives de la densité des espèces pourront être déterminés.

Les salamandres et les tritons

Les données de sur l'herpétofaune ont été prises avant traitement par un inventaire géoréférencé. Au total, 5 espèces de salamandres et de tritons ont été observées dans nos parcelles d'études. Le Tableau 12 présente la quantité des différentes espèces observées dans les sites et parcelles d'études. La salamandre cendrée est l'espèce la plus fréquente dans les parcelles d'études, soit 169 observations sur un total de 190. Cette espèce est aussi associée avec la présence de bois morts.

Les petits mammifères

Les relevés d'activité et l'abondance de petits mammifères à l'aide de piste de sable et de la méthode capture-recapture sont présentés dans les tableaux suivants. Au total, 11 espèces de petits mammifères ont été observées dans nos parcelles d'études soit le campagnol à dos roux (*Clethrionomys gapperi*), la souris sylvestre (*Peromyscus maniculatus*), la sauris sauteuse des bois (*Napaeozapus insignis*), la musaraigne cendré (*Sorex cinereus*), la autre musaraigne (*Sorex sp.*), l'écureuil roux (*Tamiasciurus hudsonicus*), le tamia rayé (*Tamias striatus*), le lièvre d'Amérique (*Lepus americanus*), le petit polatouche (*Glaucomys volans*), l'hermine (*Mustela erminea*) et deux mustélidé dont l'identification n'a pas été confirmé probablement la martre (*Martes americana*) et la moufette (*Mephitis mephitis*). Le

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Tableau 13 représente la quantité des différentes espèces capturées dans les cages dans les sites et parcelles d'études. Au total 110 petits mammifères ont été capturés ou recapturés. On note que la majorité des captures ou recaptures étaient des souris sylvestres, suivi des sauris sauteuses, des campagnols à dos roux et des tamias rayés. La dimension des cages permet difficilement aux plus grands mammifères de s'introduire. Le site avec le plus grand nombre de capture est Laurentides 2.

Tableau 11: Liste des noms latin et code utilisé pour les espèces les plus fréquentes dans cette étude.

Nom latin	Code	Nom latin	Code
<i>Trientalis borealis</i>	TRB	<i>Nemopanthus mucronatus</i>	NEM
<i>Lycopodium</i>	LY B	<i>Aster acuminatus</i>	ASA
<i>Cornus canadensis</i>	COCA	<i>Onoclea sensibilis</i>	ONS
<i>Acer rubrum</i>	ERR	<i>Iris versicolor</i>	IRV
<i>Dryopteris spinulosa</i>	DRS	<i>Athyrium filix-femina</i>	ATF
<i>Corylus cornuta</i>	COC	<i>Prunus virginiana</i>	CEV
<i>Polygonatum pubescens</i>	POP	<i>Ulmus americana</i>	ORA
<i>Erythronium americanum</i>	ERA	<i>Acer spicatum</i>	ERE
<i>Abies balsamea</i>	SAB	<i>Tilia americana</i>	TIA
<i>Lycopodium obscurum</i>	LYO	<i>Dryopteris disjuncta</i>	DRD
<i>Viburnum alnifolium</i>	VIA	<i>Dryopteris phegopteris</i>	DRP
<i>Acer saccharum</i>	ERS	<i>Impatiens capensis</i>	IMC
<i>Aralia nudicaulis</i>	ARN	<i>Lonicera canadensis</i>	LOC
<i>Fagus grandifolia</i>	HEG	<i>Taxus canadensis</i>	TAC
<i>Rubus pubescens</i>	RUP	<i>Sambucus canadensis</i>	SAC
<i>Prunus pensylvanica</i>	CEP	<i>Populus deltoides</i>	PED
<i>Lycopodium lucidulum</i>	LYL	<i>Arisaema atrorubens</i>	ARA
<i>Oxalis montana</i>	OXM	<i>Laportea canadensis</i>	LAC
<i>Cypripedium acaule</i>	CYA	<i>Dryopteris noveboracensis</i>	DRN
<i>Maianthemum canadense</i>	MAC	<i>Medeola virginiana</i>	MEV
<i>Coptis groenlandica</i>	COG	<i>Dryopteris marginalis</i>	DRM
<i>Clintonia borealis</i>	CLB	<i>Botrychium virginianum</i>	BOV
<i>Gaultheria hispidula</i>	GAH	<i>Smilacina racemosa</i>	SMR
<i>Rubus idaeus</i>	RUI	<i>Osmunda cinnamomea</i>	OSC
<i>Ribes glandulosum</i>	RIG	<i>Caulophyllum thalictroides</i>	CAT
<i>Tiarella cordifolia</i>	TIC	<i>Sambucus pubens</i>	SAP
<i>Trillium sp.</i>	TRI	<i>Viburnum cassinoides</i>	VIC
<i>Acer pensylvanicum</i>	ERP	<i>Dennstaedtia punctilobula</i>	DEP
<i>Dicentra canadensis</i>	DIC	<i>Epipactis helleborine</i>	EPH
<i>Prunus serotina</i>	CET	<i>Corallorhiza maculata</i>	COM
<i>Amelanchier sp.</i>	AME	<i>Dirca palustris</i>	DIP
<i>Apocynum androsaemifolium</i>	APA	<i>Rubus odoratus</i>	RUO
<i>Galium triflorum</i>	GAT	<i>Aster macrophyllus</i>	ASM
<i>Taraxacum officinale</i>	TAO	<i>Ribes lacustre</i>	RIL
		<i>Mitella nuda</i>	MIN

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Tableau 12: Quantité par espèces de salamandres et de tritons dans les sites et parcelles d'études.

Site	Parcelles	Masse d'œufs	Salamandre à deux lignes	Salamandre à points bleus	Salamandre cendrée	Salamandre maculée	Triton vert	Total
Laurentides 1	A				1			1
	B				5			5
	C				1			1
	D		1		6			7
	E	1			10			11
	Total	1	1		23			25
Outaouais 1	A				2			2
	B				7			7
	C				5	1		6
	D				8			8
	E	1			13			14
	Total	1			35	1		37
Supplémentaires	A	1			4			5
	B	2			4			6
	C	1			4			5
	Total	2			12			16
Outaouais 2	A	1			15		2	18
	B				3			3
	C				7		1	8
	D	1			10		1	12
	E	1			10			11
	Total	3			45		4	52

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Tableau 13: Quantité de capture ou recapture par espèces lors des 8 relevés de cage de petit mammifères dont 4 le matin et 4 le soir pour les parcelles à l'étude (soit 9 microsites par parcelles).

Site	Parcelles	Campagnol à dos roux	Grande musaraigne	Souris sauteuse	Souris sylvestre	Tamia rayé	Total
Laurentides 1	A						0
	B		1				1
	C	1	1	1			3
	D			1			1
	E		1		13		14
	Total		1	3	2	13	
Outaouais 1	A	1			3	1	5
	B	3		2	2		7
	C	1		1	4		6
	D				4		4
	E			3	4		7
	Total		5		6	17	1
Supplémentaires	A		2	1	7		10
	B		1		3		4
	C				9		9
	Total		3	1	19		23
Outaouais 2	A	2					2
	B	1					1
	C				1		1
	D						0
	E	1					1
	Total		4			1	
Laurentides 2	A			4	3		7
	B	1		1	6	3	11
	C				1	1	2
	D	1			5	2	8
	E	1		1	3	1	6
	Total		3		6	18	7
Grand total		13	6	15	68	8	110

L'indice d'activité mesuré avec le nombre de passage par espèce avec les pistes de sables montre un totale de 805 passages de mammifères (Tableau 14). Les passages de souris sylvestre étaient les plus abondant suivis de ceux des campagnols à dos roux, des sauris sauteuses et des tamias rayés. Le site avec le plus grand nombre de passages de petits mammifères est aussi Laurentides 2.

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Tableau 14: Quantité de passage par espèces lors des 8 relevés de piste de sable de petit mammifères dont 4 le matin et 4 le soir pour les parcelles à l'étude (soit 9 microsites par parcelles).

Site	Parcelles	Campagnol à dos roux					Écureuil roux		Hermine	Lièvre	Musaraigne	Mustélide (Martre)
Laurentides 1	A		9				12					
	B		2	1		1						
	C	3	1			2		1				
	D	2						2				
	E	12	1								1	
	Total	17	13	1		15		3			1	
Outaouais 1	A	7	3					4			1	
	B	3	1			1						
	C	6	1									
	D	1						2				
	E	3	3					1				
	Total	20	8			1		7			1	
Supplémentaires	A	14	1			6		12				
	B	8	3			5		2				
	C	17	6			4						
	Total	39	10			15		14				
Outaouais 2	A	8						6			4	
	B	8				1		1				
	C	10	1			1		3			10	
	D	4	2	1				3				
	E	5	2					3			1	
	Total	35	5	1		2		16			15	
Laurentides 2	A	1				1		10				
	B	5	3					7			1	
	C	11						4			1	
	D	6						4			2	
	E	3						3				
	Total	26	3			1		28			4	
Grand total		137	39	2		34		68			21	

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

Tableau 15 (suite): Quantité de passage par espèces lors des 8 relevés de piste de sable de petit mammifères dont 4 le matin et 4 le soir pour les parcelles à l'étude (soit 9 microsites par parcelles).

Site	Parcelles				Total général		
		Mustélide (Mouffette)	Polatouche	Souris sauteuse		Souris sylvestre	Tamia rayée
Laurentides 1	A				3	24	
	B			1	2	3	10
	C			1	2	4	14
	D			2	7	4	17
	E			10	23	7	54
	Total			14	34	21	119
Outaouais 1	A			3	25	7	50
	B			2	11	3	21
	C				8	3	18
	D				5	1	9
	E			1	7	3	18
	Total			6	56	17	116
Supplémentaires	A				35	4	72
	B			3	24	6	51
	C				26	12	65
	Total			3	85	22	188
Outaouais 2	A	2		3	5	5	33
	B			4	7	2	23
	C		1	6	13	1	46
	D			5	7	2	24
	E			5	5	5	26
	Total	2	1	23	37	15	152
Laurentides 2	A			19	20	4	55
	B			9	29	2	56
	C			8	19	1	44
	D			9	24	5	50
	E			3	13	3	25
	Total			48	105	15	230
Grand total		2	1	94	317	90	805

RÉFÉRENCES

- Adegbidi, H.G., Volk, T.A., White, E.H., Abrahamson, L.P., Briggs, R.D., Bickelhaupt, D.H., 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York state. *Biomass and Bioenergy*.
- Anderson, D.R., Burnham, K.P., Thompson, W.L., 2000. Null Hypothesis Testing: Problems, Prevalence, and an Alternative. *The Journal of Wildlife Management*.
- 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*.
- Bonin, J., Desroches, J.-F., Ouellet, M., Leduc, A., 1999. Les forêts anciennes: refuges pour les salamandres. *Le naturaliste canadien*.
- Brady, N.C., 1974. *The nature and properties of soil* 8th Edition.
- Brais, S., Paré, D., Camiré, C., Rochon, P., Vasseur, C., 2002. Nitrogen net mineralization and dynamics following whole-tree harvesting and winter windrowing on clayey sites of northwestern Quebec. *Forest Ecology and Management*.
- Chapin, F.S., Kedrowski, R.A., 1983. Seasonal Changes in Nitrogen and Phosphorus Fractions and Autumn Retranslocation in Evergreen and Deciduous Taiga Trees. *Ecology*.
- Deconchat, M., Balent, 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*.
- Desroches, J.-F., Rodrigue, D., 2004. Amphibiens et reptiles du Québec et des Maritimes.
- Duchesne, L., Houle, D., 2008. Impact of nutrient removal through harvesting on the sustainability of the boreal forest. *Ecological Applications*.
- Ecke, F., Löfgren, O., Sörlin, D., 2002. Population dynamics of small mammals in relation to forest age and structural habitat factors in northern Sweden. *Journal of Applied Ecology*.
- Etcheverry, P., Ouellet, J.-P., Crête, M., 2005. Response of small mammals to clear-cutting and precommercial thinning in mixed forests of southeastern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*.

- 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*.
- Fife, D.N., Nambiar, E.K.S., Saur, E., 2008. Retranslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment. *Tree Physiology*.
- Fleming, R.L., Laporte, M.F., Hogan, G.D., Hazlett, P.W., 2006. Effects of harvesting and soil disturbance on soil CO₂ efflux from a jack pine forest. *Canadian Journal of Forest Research*.
- Galois, P., Ouellet, M., 2005. Le grand bois de St-Grégoire, un refuge pour l'herpétofaune dans la plaine montréalaise. *Le naturaliste canadien*.
- Hacker, J.J., 2005. Effects of logging residue removal on forest sites.
- Hagan, J.M., Grove, S.L., 1999. Coarse woody debris: Humans and nature competing for trees. *Journal of Forestry*.
- Heatwole, H., 1962. Environmental factors influencing local distribution and activity of the salamander, *Plethodon cinereus*. *Ecology*.
- Lambers, H., Chapin III, F.S., Pons, T.L., 2008. *Plant Physiological Ecology*.
- Lambert, M.C., Ung, C.H., Raulier, F., 2005. Canadian national tree aboveground biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research*.
- Landmann, G., Gosselin, F., Bonhême, I., 2009. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière: implications pour la biodiversité et les ressources naturelles.
- Larcher, W., 1995. *Physiological plant ecology, ecophysiology and stress physiology of functional groups*, 3rd edition.
- Lemoine, B., Ranger, J., Gelpe, J., 1990. Distribution of nutrients in the various components of young stands of maritime pine: functional interpretation of results. *Annales des Sciences Forestières*.
- Mann, L.K., Johnson, D.W., West, D.C., Cole, D.W., Hornbeck, J.W., Martin, C.W., Riekerk, H., Smith, C.T., Swank, 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*.
- Miller, H.G., 1995. The influence of stand development on nutrient demand, growth and allocation. *Plant and Soil* 168-169, 225-232.

- Niklas, K.J., Owens, T., Reich, P.B., Cobb, E.D., 2005. Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth. *Ecology Letters*.
- Nolet, P., Roy, M.-E., Delagrangé, S., 2011. Mise en place de dispositifs de suivi des effets écologiques et environnementaux de la récolte intégrée de biomasse forestière dans les peuplements feuillus et mixtes de la région de l'Outaouais et des Laurentides. Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue. Ripon, Qc. 22 p.
- Olsson, B.A., Staff, H., 1995. Influence of harvesting intensity of logging residues on ground vegetation in coniferous forests. *Journal of Applied Ecology* 32, 640.
- Ouellet, M., Galois, P., Pétel, R., 2004. Inventaire des amphibiens et des reptiles sur le mont Royal au cours de l'année 2004. Rapport scientifique réalisé pour la Ville de Montréal, Québec.
- Page-Dumroese, D.S., Jurgensen, M.F., Tiarks, A.E., Ponder, J., Sanchez, F.G., Fleming, R.L., Kranabetter, J.M., Powers, R.F., Stone, D.M., Elioff, J.D., Scott, D.A., 2006. Soil physical property changes at the North American long-term soil productivity study sites: 1 and 5 years after compaction. *Canadian Journal of Forest Research*.
- Paré, D., Bernier, P., Thiffault, E., Titus, B., 2011. Le potentiel de la biomasse forestière comme source d'écoénergie pour le Canada. *The Forestry Chronicle*.
- Robitaille, A., Saucier, J.-P., 1998. Paysages régionaux du Québec méridional.
- Rytter, L., 2002. Nutrient content in stems of hybrid aspen as affected by tree age and tree size, and nutrient removal with harvest. *Biomass and Bioenergy*.
- Slesak, R.A., Harrington, T.B., Schoenholtz, S.H., 2010. Soil and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) foliar nitrogen responses to variable logging-debris retention and competing vegetation control in the Pacific Northwest. *Canadian Journal of Forest Research* 40, 254-264.
- Sohlenius, B., 1996. Structure and composition of the nematode fauna in pine forest soil under the influence of clear-cutting. Effects of slash removal and field layer vegetation. *European journal of soil biology* 32, 1-14.
- Staaf, H., Olsson, B.A., 1994. Effects of slash removal and stump harvesting on soil water chemistry in a clearcutting in SW Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 9, 305-310.
- Thiffault, E., Hannam, K.D., Paré, D., Titus, B.D., Hazlett, P.W., Maynard, D.G., Brais, S., 2011. Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests — A review. *Environmental Reviews* 19, 278-309.

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

- Thiffault, E., Paré, D., Bélanger, N., Munson, A., Marquis, F., 2006. Harvesting intensity at clear-felling in the boreal forest: Impact on soil and foliar nutrient status. *Soil Science Society of America Journal*.
- Vadeboncoeur, M.A., 2010. Meta-analysis of fertilization experiments indicates multiple limiting nutrients in northeastern deciduous forests. *Canadian Journal of Forest Research*.
- Wang, W.Q., Wang, M., Lin, P., 2003. Seasonal changes in element contents in mangrove element retranslocation during leaf senescence. *Plant & Soil*.
- Wyman, R.L., Jancola, J., 1992. Degree and scale of terrestrial acidification and amphibian community structure. *Journal of Herpetology*.
- Yanai, R.D., 1998. The effect of whole-tree harvest on phosphorus cycling in a northern hardwood forest. *Forest Ecology and Management*.
- 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.

ANNEXE 1: RESULTATS DE LA COMPARAISON DE MODELES POUR LA QUANTITE DE BIOMASSE SECHE (QBIOM; KG).

Explications pour l'interprétation des résultats de comparaison de LMER :

La colonne 'Modèle' comprend la liste des 6 modèles testés et comparés dans l'analyse. La valeur de 'AIC' est un indice qui permet de comparer les modèles entre eux, la valeur la plus faible étant celle qui correspond au meilleur modèle. Dans notre cas où l'effectif est faible la valeur de AIC est corrigée et devient l'indice AICc. Dans la colonne DeltaAICc on évalue la 'distance' qui sépare l'AICc du meilleur modèle aux valeurs de AICc des autres modèles. On comprend ici qu'il n'est pas question d'accepter comme meilleur modèle un modèle qui ne serait pas largement le meilleur modèle. Ainsi, on calcule dans la colonne Wi, un indice de poids qui donne une probabilité (%) de statuer que le modèle est le meilleur. En dessous de 10% le modèle n'est pas considéré.

Dans l'exemple ci-dessous, le meilleur modèle (**en gras**) est donc celui qui additionne les deux termes SP*COMP et DHP*COMP. Au regard des modèles 2 et 3 qui contiennent uniquement un de ces 2 termes, on peut conclure que le terme DHP*COMP (souligné) est le terme principal pour expliquer la variabilité de Q_{biom} .

Modèle	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	1977	-981,4	1977,4	290,9	0,00
SP*Comp	2	191	11	1949	-963,3	1950,1	263,5	0,00
<u>DHP*Comp</u>	<u>3</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>1724</u>	<u>-850,9</u>	<u>1725,3</u>	<u>38,7</u>	<u>0,00</u>
Age*Comp	4	191	11	1901	-939,3	1902,1	215,5	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	1664	-826,9	1686,5	0,0	100,00
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	1877	-923,5	1879,7	193,2	0,00

ANNEXE 2: RESULTATS DE LA COMPARAISON DE MODELES LMER POUR LA QUANTITE EN ELEMENT (QX; G). CF. ANNEXE I POUR LES EXPLICATIONS D'INTERPRETATION DES RESULTATS DE LMER

								P
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	4141	-2063	4140,6	163,9	0,00
SP*Comp	2	191	11	4065	-2021	4065,5	88,7	0,00
<u>DHP*Comp</u>	<u>3</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>4052</u>	<u>-2015</u>	<u>4053,5</u>	<u>76,7</u>	<u>0,00</u>
Age*Comp	4	191	11	4106	-2042	4107,5	130,7	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	3975	-1972	3976,7	0,0	100,00
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	4024	-1997	4026,7	50,0	0,00

								AI
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	7,364	3,318	8,0	207,7	0,00
SP*Comp	2	191	11	22,47	-0,237	23,9	223,7	0,00
DHP*Comp	3	191	11	-201,2	111,6	-199,7	0,0	96,21
Age*Comp	4	191	11	-24,46	23,23	-23,0	176,7	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	-196	113	-193,3	6,5	3,79
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	-4,846	17,42	-2,1	197,6	0,00

								Ca
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	2468	-1227	2468,6	197,9	0,00
SP*Comp	2	191	11	2389	-1184	2391,5	120,7	0,00
<u>DHP*Comp</u>	<u>3</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>2375</u>	<u>-1176</u>	<u>2375,5</u>	<u>104,7</u>	<u>0,00</u>
Age*Comp	4	191	11	2437	-1208	2439,5	168,7	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	2269	-1119	2270,7	0,0	100,00
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	2364	-1167	2366,7	96,0	0,00

								K
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	1964	-975	1964,6	171,5	0,00
SP*Comp	2	191	11	1907	-942,5	1908,5	115,3	0,00
<u>DHP*Comp</u>	<u>3</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>1873</u>	<u>-925,5</u>	<u>1874,5</u>	<u>81,3</u>	<u>0,00</u>
Age*Comp	4	191	11	1949	-963,3	1950,1	156,9	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	1790	-880,2	1793,1	0,0	100,00
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	1894	-932	1896,7	103,6	0,00

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

								Na
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	1309	-647,3	1309,2	96,1	0,00
SP*Comp	2	191	11	1300	-638,9	1301,3	88,1	0,00
<u>DHP*Comp</u>	<u>3</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>1219</u>	<u>-598,5</u>	<u>1220,5</u>	<u>7,3</u>	<u>2,49</u>
Age*Comp	4	191	11	1314	-645,8	1315,1	101,9	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	1210	-590,2	1213,1	0,0	97,51
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	1302	-636,1	1304,9	91,8	0,00

								Mg
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	1519	-752,5	1519,6	173,5	0,00
<u>SP*Comp</u>	<u>2</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>1434</u>	<u>-706,1</u>	<u>1435,7</u>	<u>89,5</u>	<u>0,00</u>
<u>DHP*Comp</u>	<u>3</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>1437</u>	<u>-707,3</u>	<u>1438,1</u>	<u>91,9</u>	<u>0,00</u>
Age*Comp	4	191	11	1514	-746,1	1515,7	169,5	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	1343	-656,7	1346,1	0,0	100,00
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	1433	-701,4	1435,5	89,4	0,00

								N
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	2589	-1287	2588,6	207,9	0,00
SP*Comp	2	191	11	2539	-1258	2539,5	158,7	0,00
<u>DHP*Comp</u>	<u>3</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>2437</u>	<u>-1208</u>	<u>2439,5</u>	<u>58,7</u>	<u>0,00</u>
Age*Comp	4	191	11	2531	-1254	2531,5	150,7	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	2379	-1174	2380,7	0,0	100,00
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	2480	-1225	2482,7	102,0	0,00

ANNEXE 3: RESULTATS DE LA COMPARAISON DE MODELES LMER POUR LA CONCENTRATION EN ELEMENT (QX; G). CF. ANNEXE I POUR LES EXPLICATIONS D'INTERPRETATION DES RESULTATS DE LMER

								P
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	2597	-1291	2596,6	43,9	0,00
<u>SP*Comp</u>	<u>2</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>2563</u>	<u>-1270</u>	<u>2563,5</u>	<u>10,7</u>	<u>0,41</u>
DHP*Comp	3	191	11	2583	-1281	2585,5	32,7	0,00
Age*Comp	4	191	11	2587	-1282	2587,5	34,7	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	2549	-1260	2552,7	0,0	87,72
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	2553	-1262	2556,7	4,0	11,87

								AI
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	631,4	-308,7	632,0	0,0	86,19
SP*Comp	2	191	11	634,1	-306,1	635,7	3,7	13,81
DHP*Comp	3	191	11	659,1	-318,5	660,5	28,5	0,00
Age*Comp	4	191	11	671,7	-324,8	673,1	41,1	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	662	-316	664,7	32,7	0,00
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	674,7	-322,4	677,5	45,5	0,00

								Ca
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	3249	-1618	3250,6	121,9	0,00
<u>SP*Comp</u>	<u>2</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>3160</u>	<u>-1569</u>	<u>3161,5</u>	<u>32,7</u>	<u>0,00</u>
DHP*Comp	3	191	11	3219	-1598	3219,5	90,7	0,00
Age*Comp	4	191	11	3222	-1600	3223,5	94,7	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	3126	-1548	3128,7	0,0	98,20
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	3134	-1552	3136,7	8,0	1,80

								K
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	2665	-1326	2666,6	137,9	0,00
<u>SP*Comp</u>	<u>2</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>2543</u>	<u>-1260</u>	<u>2543,5</u>	<u>14,7</u>	<u>0,06</u>
DHP*Comp	3	191	11	2648	-1313	2649,5	120,7	0,00
Age*Comp	4	191	11	2652	-1315	2653,5	124,7	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	2525	-1248	2528,7	0,0	99,27
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	2535	-1253	2538,7	10,0	0,67

Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

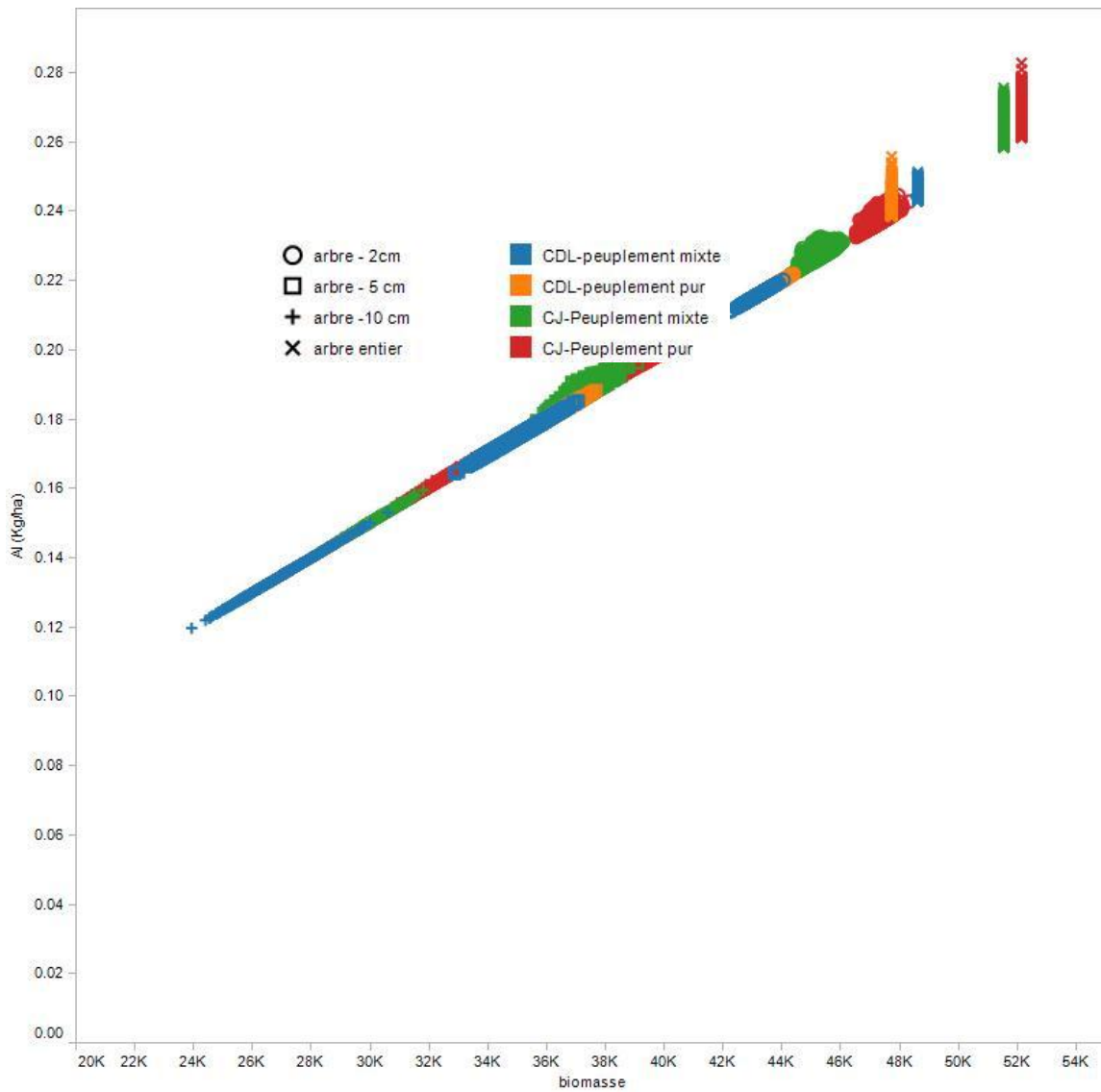
								Na
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	2145	-1066	2146,6	33,9	0,00
<u>SP*Comp</u>	<u>2</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>2117</u>	<u>-1047</u>	<u>2117,5</u>	<u>4,7</u>	<u>6,42</u>
DHP*Comp	3	191	11	2141	-1059	2141,5	28,7	0,00
Age*Comp	4	191	11	2140	-1059	2141,5	28,7	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	2113	-1041	2114,7	2,0	25,17
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	2109	-1040	2112,7	0,0	68,41

								Mg
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	2260	-1123	2260,6	93,9	0,00
<u>SP*Comp</u>	<u>2</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>2177</u>	<u>-1078</u>	<u>2179,5</u>	<u>12,7</u>	<u>0,15</u>
DHP*Comp	3	191	11	2251	-1114	2251,5	84,7	0,00
Age*Comp	4	191	11	2254	-1116	2255,5	88,7	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	2163	-1067	2166,7	0,0	87,95
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	2168	-1069	2170,7	4,0	11,90

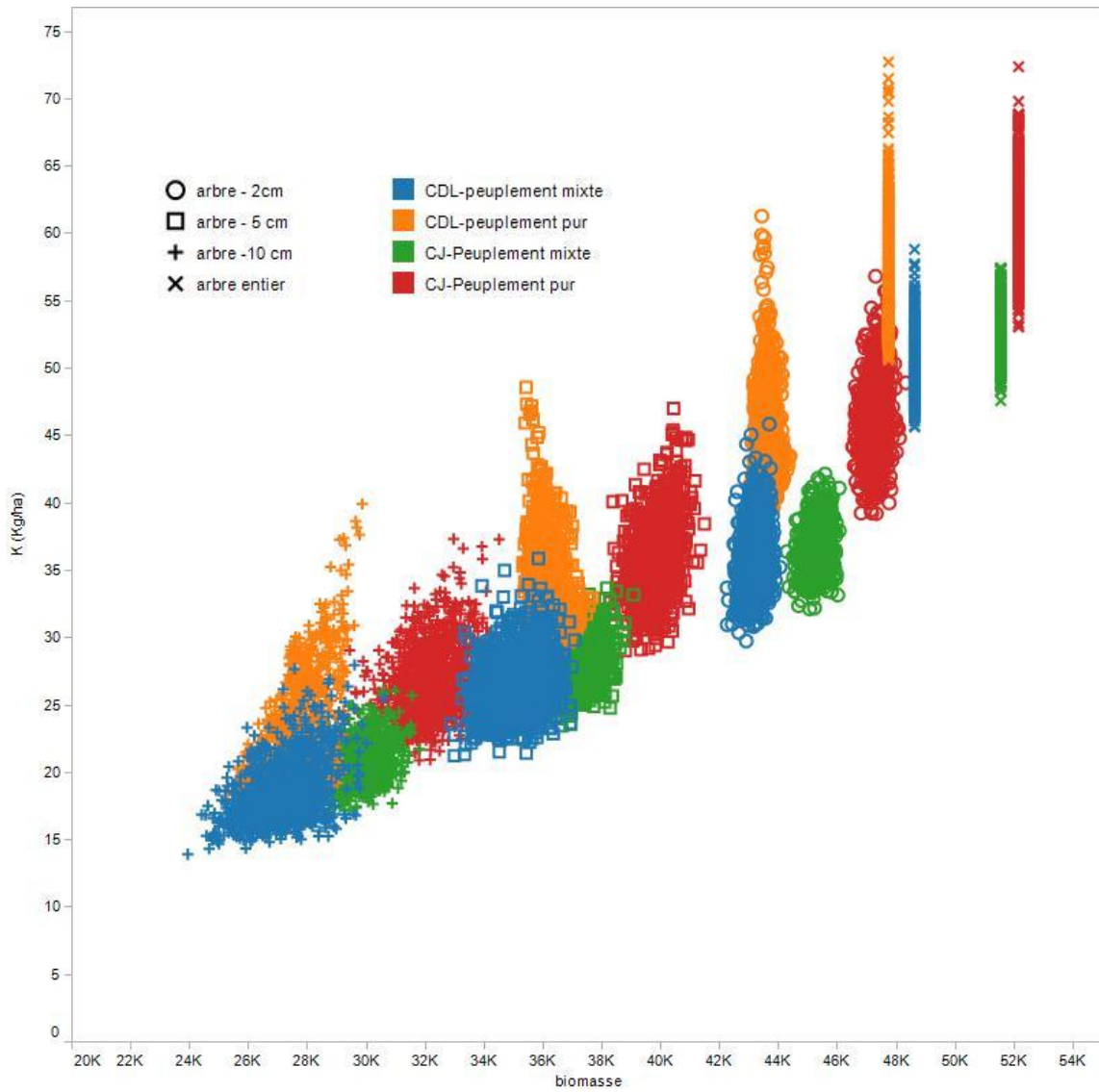
								N
Model	Id	n	K	AIC	LogLik	AICc	DeltaAICc	Wi
Comp	1	191	7	3406	-1696	3406,6	81,9	0,00
<u>SP*Comp</u>	<u>2</u>	<u>191</u>	<u>11</u>	<u>3353</u>	<u>-1665</u>	<u>3353,5</u>	<u>28,7</u>	<u>0,00</u>
DHP*Comp	3	191	11	3375	-1676	3375,5	50,7	0,00
Age*Comp	4	191	11	3381	-1679	3381,5	56,7	0,00
SP*Comp+DHP*Comp	5	191	15	3322	-1646	3324,7	0,0	88,08
SP*Comp+Age*Comp	6	191	15	3327	-1648	3328,7	4,0	11,92

ANNEXE 4: EXPORTATION DES ELEMENTS EN FONCTION DE LA BIOMASSE RECOLTEE

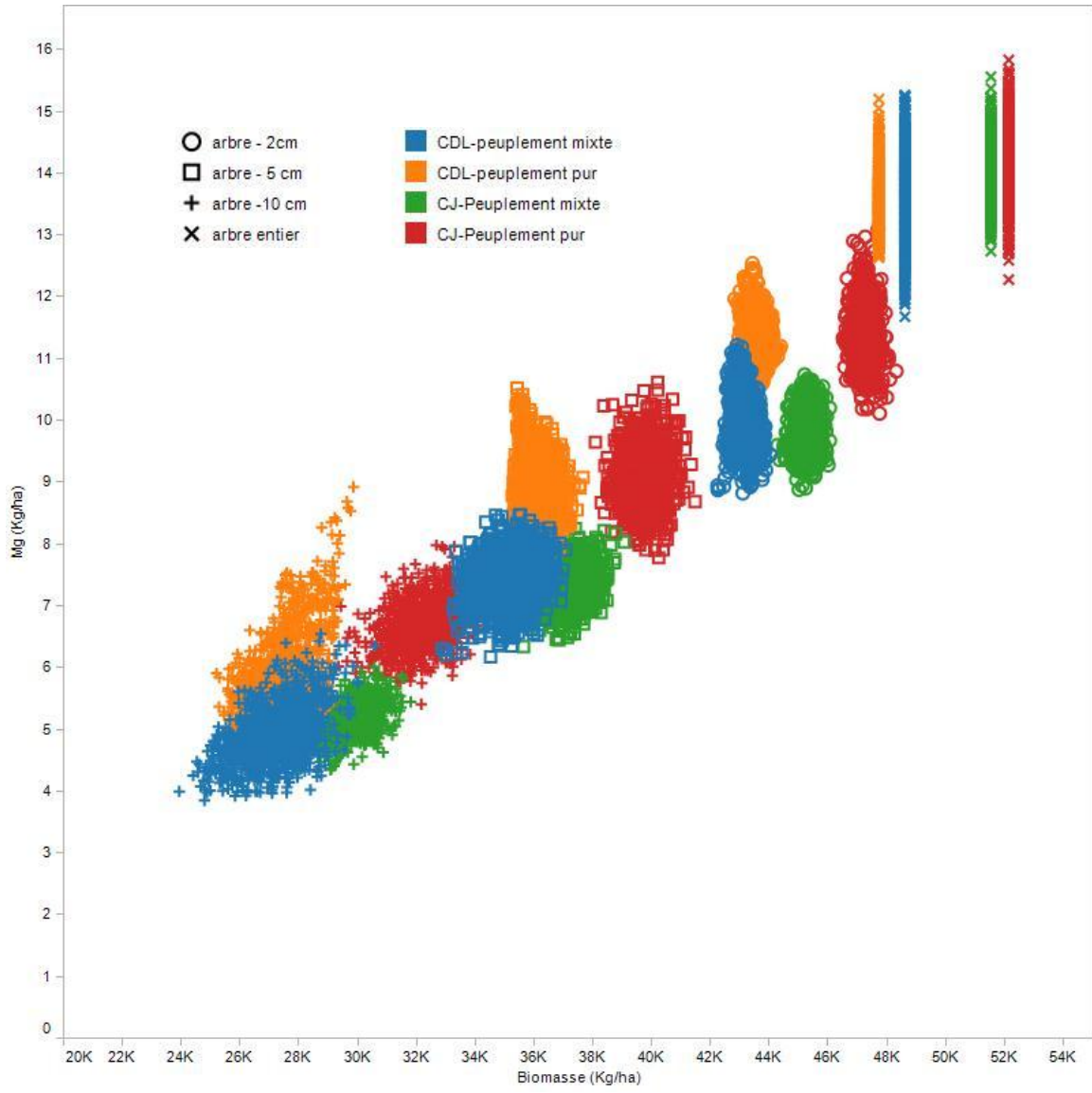
Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques



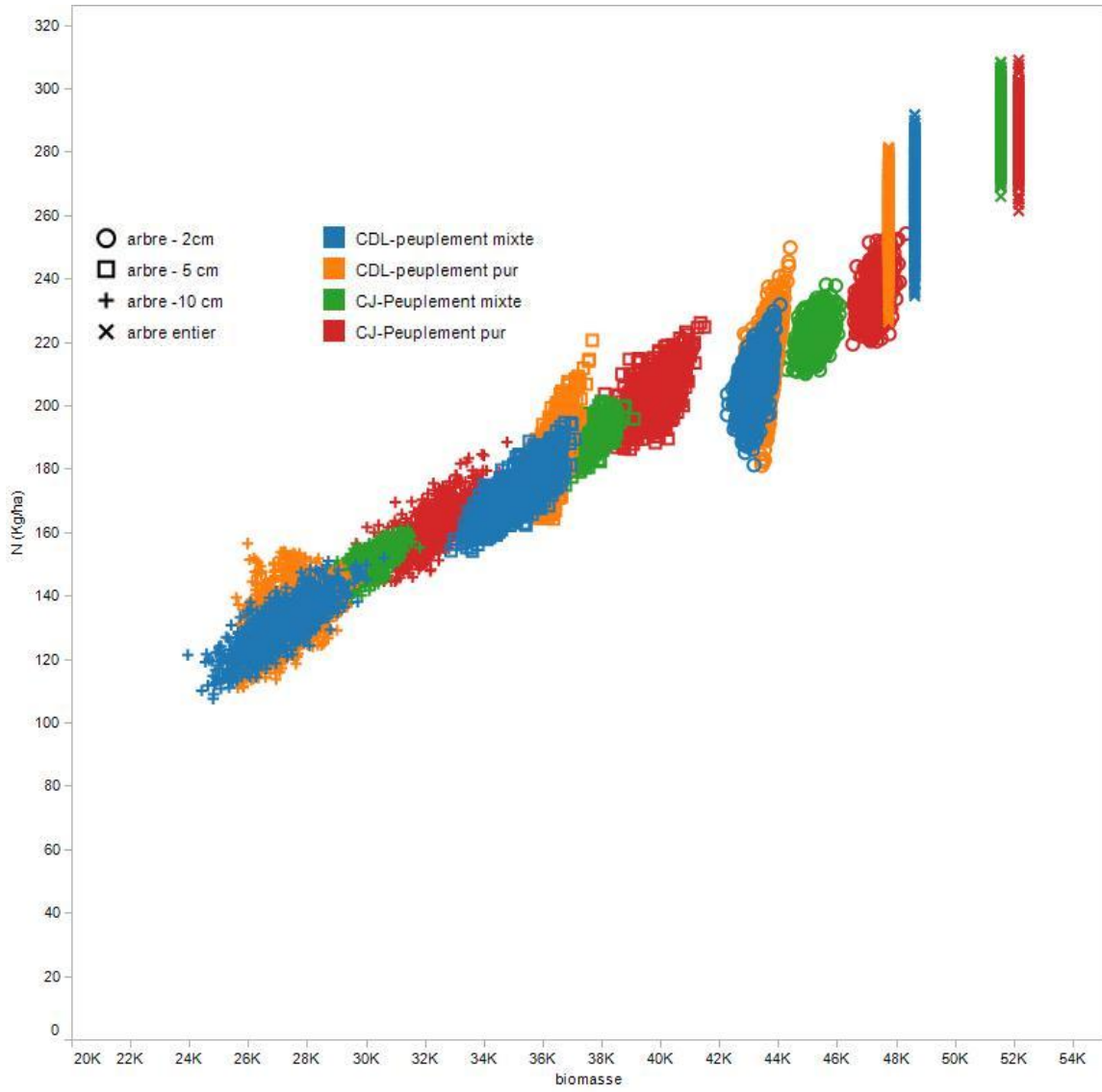
Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques



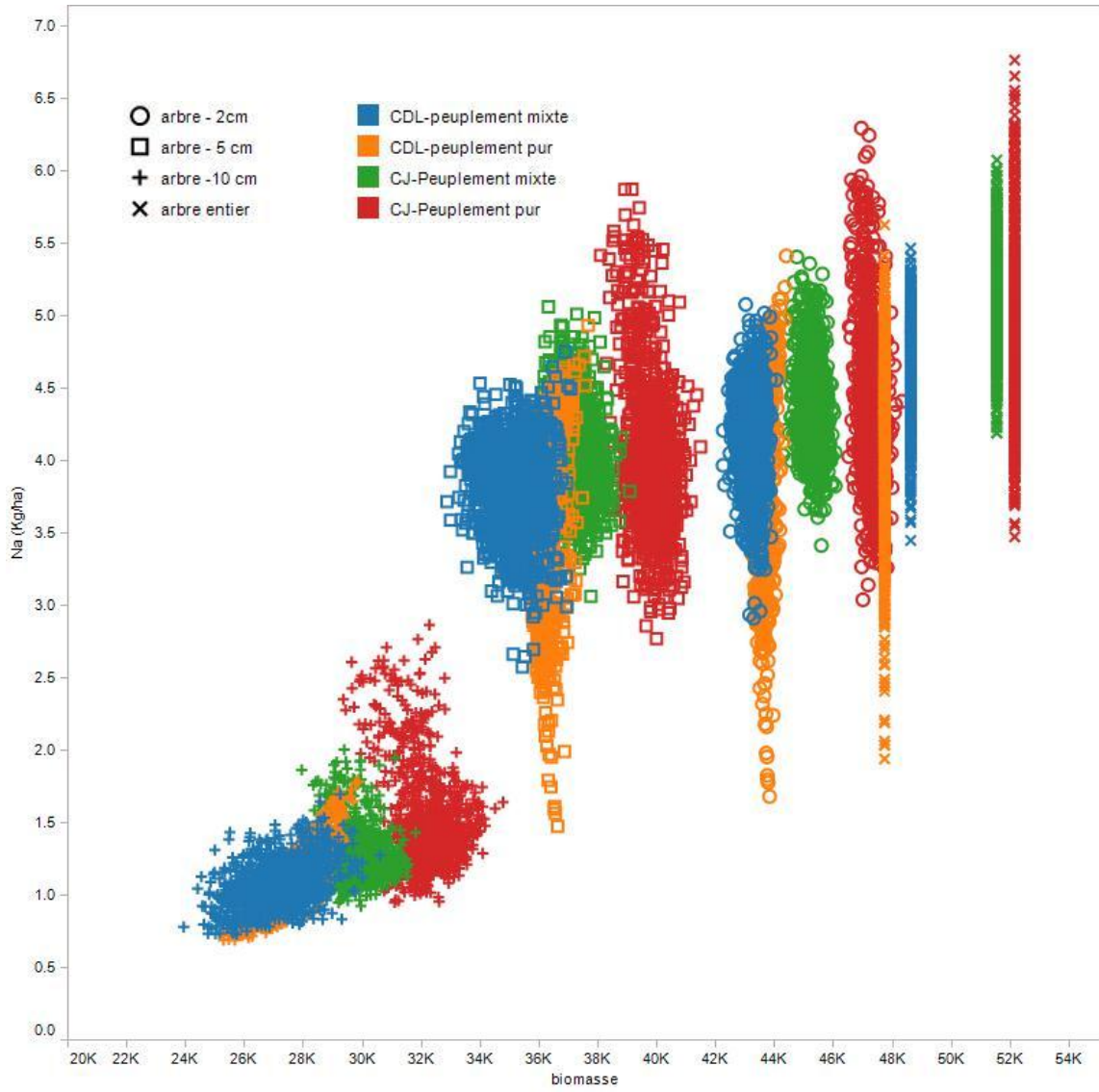
Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques



Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques



Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques



Récolte de la biomasse forestière : Effets écologiques

