

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

**EFFETS DE L'ÉCLAIRCIE COMMERCIALE DANS LES
PLANTATIONS D'ÉPINETTES SUR LA PRODUCTIVITÉ
DES CHAMPIGNONS FORESTIERS COMESTIBLES**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en Gestion de la faune et de ses habitats

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© MYRIAM DROLET-LAMBANY

Avril 2013

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

Composition du jury :

Robert Schneider, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Luc Sirois, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

J.André Fortin, examinateur externe, Université Laval

Dépôt initial le 14 décembre 2012

Dépôt final le 25 avril 2013

REMERCIEMENTS

Je souhaite dans un premier temps remercier Luc Sirois, directeur de recherche de ce projet, et titulaire de la Chaire de recherche sur la forêt habitée (CRFH), pour son implication et sa confiance tout au long de cette maîtrise. Sa passion pour la forêt, sa rigueur scientifique et sa patience exemplaire ont marqué la progression de ce projet, qui a été réalisé dans une ambiance toujours positive. Merci à Guy Langlais, de Biopterre, sans qui ce projet n'aurait pas été possible. Son enthousiasme et son esprit novateur m'ont permis de découvrir le monde fascinant des champignons, et de mener à terme cette maîtrise pleine de promesses pour le futur.

Je remercie J.A Fortin pour avoir partagé ses innombrables connaissances en mycologie et avoir su éclairer ma démarche scientifique. Un merci sincère à Alain Caron pour son soutien tout au long de mes analyses statistiques, et pour sa patience que l'on pourrait certainement qualifier d'inébranlable. Merci à Fernando Martinez-Pena et Joaquin Latorre Minguell, de CESEFOR, en Espagne, pour leur accueil on ne peut plus chaleureux à l'occasion d'un stage d'étude.

Merci aux techniciens Émilie Dussault-Chouinard, Pierre Bouchard et Frédéric Tremblay, qui ont participé avec beaucoup d'enthousiasme, de rigueur et de professionnalisme à la saison d'échantillonnage et qui ont ainsi grandement contribué au succès du projet. Merci aussi à la famille Dussault-Chouinard, qui m'a chaleureusement hébergé lors des visites sur le terrain. Un immense merci à tous les étudiants délégués de la Chaire de recherche sur la forêt habitée, particulièrement à Valérie Delisle-Gagnon, Olivier Deshaies, Véronique Parent Lacharité, David Coulombe et Ariane Tremblay-D'Aoust, qui ont fait de ces années de recherche un moment mémorable de ma vie, rempli de bons souvenirs.

Merci aux Agences de mise en valeur des forêts privées du Bas-St-Laurent et de Chaudière-Appalaches pour leur précieuse collaboration au projet, ainsi qu'à tous les

propriétaires forestiers qui m'ont permis d'accéder à leur forêt et qui ont gentiment renoncé à leurs champignons forestiers pour les besoins de l'étude. Merci à Biopterre de m'avoir accueillie au sein de l'entreprise et permis de découvrir une équipe dynamique et passionnée, pour laquelle les projets innovateurs n'ont pas de limites.

Pour leur soutien au cours des dernières années, je souhaite de tout mon cœur remercier mes amis et membres de ma famille. Merci à mon père, Gil Lambany, qui ne s'est jamais tanné de me relire et à ma mère, Johanne Drolet, qui a toujours trouvé les bons mots pour m'encourager. Merci à Véronic Parent, Jean-François Lamarre et Patrick Bouchard d'avoir partagé mon quotidien tout au long de cette période; vous êtes mes amis les plus précieux. Finalement, le plus grand des merci à toi, Vincent qui, entre deux poêlées de chanterelles et de pieds-de-mouton, a su m'encourager continuellement et me donner l'envie d'aller encore plus loin.

Ce projet a été réalisé avec le financement du CRSNG, du FQRNT et de Biopterre. Il n'aurait pas été possible sans l'appui financier du CLD et de la MRC de l'Islet.

RÉSUMÉ

Les champignons forestiers comestibles occupent un rôle fondamental dans l'écosystème forestier, via la mycorhization. La symbiose que les champignons forestiers forment avec les arbres soulève la question de l'effet des pratiques sylvicoles sur leur productivité et leur diversité. Notre étude vise donc à vérifier les impacts de l'éclaircie commerciale dans les plantations d'épinettes i) sur la productivité des champignons forestiers comestibles et ii) sur les caractéristiques biologiques et physico-chimiques des peuplements forestiers susceptibles d'influencer la productivité des champignons forestiers comestibles.

Au cours de l'été et de l'automne 2011, 57 transects permanents ont été installés dans des plantations d'épinettes blanches (*Picea glauca*) et d'épinettes Norvège (*Picea abies*), dont la moitié avait subi une éclaircie commerciale au cours des 5 dernières années. La totalité des champignons comestibles retrouvés dans les transects a été récoltée hebdomadairement, puis pesée. Des variables biologiques et physico-chimiques, à savoir : l'âge, la composition et la surface terrière du peuplement, l'âge du traitement d'éclaircie, le pourcentage de débris ligneux et de plantes herbacées au sol, la luminosité du peuplement, le pH, la température du sol, la texture du sol et la pente ont été mesurées pour décrire les transects. Les résultats de notre étude démontrent que *Boletus edulis* et *Chalciporus piperatus* sont significativement moins abondants dans les plantations d'épinettes éclaircies, alors qu'une forte tendance en ce sens est aussi observée chez *Cathartelasma ventricosum*. Une analyse en composantes principales réalisée avec les variables environnementales décrit un espace d'ordination où les deux premiers axes expliquent 50% de la variance entre les plantations témoins et éclaircies. Les sites éclaircis ont davantage de débris ligneux au sol, de plantes herbacées et de luminosité, variables qui ont toutes une corrélation négative avec les espèces affectées par le traitement.

Dans un contexte où l'intérêt et la demande pour les champignons forestiers comestibles est grandissante, la valorisation des champignons comestibles demeure une piste de solution intéressante dans la diversification des ressources forestières exploitées. Des stratégies sylvicoles minimisant plus particulièrement les impacts sur la productivité et la diversité fongique, notamment afin de maintenir une bonne productivité de la forêt à long terme, demeurent à développer.

Mots clés : Champignons forestiers comestibles, éclaircie commerciale, mycorhize, traitement sylvicole, mycosylviculture, produits forestiers non-ligneux

ABSTRACT

Edible forest mushrooms play a fundamental role in forest ecosystems through mycorrhization. Because of the symbiotic relationship between fungi and trees, we want to see the effects of silviculture on mushroom productivity and diversity. The aim of this study is to verify the impact of commercial thinning in spruce plantations on both the productivity of edible mushrooms as well as the biological and physico-chemical properties of forest stands that may influence the productivity of forest mushrooms.

Throughout the summer and fall of 2011, 57 permanent transects were established in plantations of White spruce (*Picea glauca*) and Norway spruce (*Picea abies*). Half of the plantations had been commercially thinned during the 5 preceding years. All edible mushrooms found in the transects were collected and weighed weekly. Biological and physico-chemical properties were measured to describe the transects, namely: age, composition and stand basal area, age of thinning treatment, the percentage of coarse woody debris and herbaceous plants on soil, light stand, pH, soil temperature, soil texture and slope. The study's results showed that *Boletus edulis* and *Chalciporus piperatus* were significantly less abundant in thinned plantations, while a similar strong tendency was also observed in the case of *Cathartelasma ventricosum*. A principal component analysis (PCA) performed with environmental variables describes a space where the two first axes demonstrate 50% of the variance between the control and thinned plantations. The thinned plantations were characterized by more coarse woody debris, herbaceous plants and light, all variables having a negative correlation with the species affected by the treatment.

Given the growing interest in and demand for edible forest mushrooms, the promotion and enhancement of edible fungi remains a viable strategy for diversifying forest resources. There is still room for development of silvicultural practices that minimize the impacts on productivity and fungal diversity, especially to maintain good long term forest productivity.

Key-words: Edible forest mushrooms, commercial thinning, mycorrhiza, silvicultural treatment, micosylviculture, mycosilviculture, non-timber forest product

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	VII
RÉSUMÉ.....	IX
TABLE DES MATIÈRES.....	XIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
LISTE DES FIGURES	XVII
1. INTRODUCTION	1
1.2 CONTEXTE FORESTIER REGIONAL	2
1.3 LES CHAMPIGNONS FORESTIERS.....	2
1.4 IMPACTS DES TRAITEMENTS SYLVICOLES SUR LA FLORE FONGIQUE	3
1.5 OBJECTIFS	7
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	9
2.1 AIRE D'ETUDE.....	9
2.2 SELECTION DES SITES D'ETUDE	9
2.3 STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE	12
2.4 INVENTAIRES DE CHAMPIGNONS.....	12
2.5 CARACTERISATION DES SITES D'ETUDE	13
3. 3. ANALYSES STATISTIQUES	15
3.1 EFFETS DU TRAITEMENT D'ECLAIRCIE COMMERCIALE SUR LA PRODUCTIVITE DES CHAMPIGNONS FORESTIERS COMESTIBLES.....	15
3.2 RELATION CHAMPIGNON-ENVIRONNEMENT	17
3.3 INFLUENCE DE LA COMPOSITION ARBORESCENTE DES PLANTATIONS	18

4.	4. RÉSULTATS.....	19
4.1	EFFETS DU TRAITEMENT D'ECLAIRCIE COMMERCIALE SUR LA PRODUCTIVITE DES CHAMPIGNONS FORESTIERS COMESTIBLES	19
4.2	RELATION CHAMPIGNON-ENVIRONNEMENT.....	22
5.	DISCUSSION	29
5.1	DIMINUTION DU NOMBRE DE SPOROPHORES DANS LES PLANTATIONS SUITE A L'ECLAIRCIE COMMERCIALE	29
5.1.2	PRESENCE D'HERBACEES.....	32
5.2	LA SURFACE TERRIERE, L'ACTIVITE PHOTOSYNTHETIQUE DES ARBRES ET LES CONDITIONS DU SOL.....	33
5.3	AUGMENTATION DU POIDS DES CHAMPIGNONS DANS L'ECLAIRCIE COMMERCIALE.....	34
6.	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	35
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Espèces de champignons ectomycorhiziens à fort potentiel commercial inventoriées.....	13
Tableau 2 : Comparaison des abondances absolues et relatives du nombre de sporophores des espèces de champignons forestiers à l'étude entre les plantations d'épinettes témoin et les plantations éclaircies.....	20
Tableau 3 : Contribution relative, valeurs propres, pourcentage.....	22
Tableau 4 : Contribution relative, valeurs propres, pourcentage cumulé de la variance expliquée pour chacun des axes (PVE) de l'analyse canonique de redondance, mettant en relation les variables environnementales et les abondances de champignons.....	24
Tableau 5 : Valeurs de p des facteurs fixes inclus dans le modèle linéaire mixte	26
Tableau 6 : Valeur de p des facteurs fixes inclus dans le modèle linéaire simple mettant en relation le nombre total de sporophores des différentes espèces de champignons et les variables environnementales, sans pseudoréplication. Entre parenthèses : sens de la relation entre le champignon et la variable, selon un test de corrélation de Spearman.....	27

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Localisation des plantations sélectionnées pour l'étude (plantations éclaircies en rouge et plantations témoins en jaune) 11
- Figure 2 : Poids moyens des sporophores sains (<20% de dégradation) pour les 5 groupes de champignons forestiers comestibles à l'étude, en fonction du traitement . 21
- Figure 3 : Analyse en composantes principales incluant les variables environnementales mesurées dans les plantations témoins (T) et les plantations éclaircies (E) (Axe 1 et 2)..... 23
- Figure 4 : Diagramme de dispersion des champignons forestiers comestibles à l'étude (en rouge) selon les deux premiers axes de l'analyse canonique de redondance des variables environnementales sélectionnées 25

1. INTRODUCTION

Les champignons forestiers comestibles à potentiel commercial constituent une ressource méconnue et peu exploitée au Québec. L'émergence de ce secteur d'activité est pourtant bien dynamique, et constitue une avenue prometteuse vers la diversification des ressources forestières exploitées, pouvant stimuler l'économie des régions touchées par la crise forestière qui sévit depuis déjà plusieurs années au Québec (Lamérant *et al.*, 2008; CREBSL, 2010; MRNF, 2008). La loi sur l'aménagement durable du territoire forestier, adoptée en 2010, encourage d'ailleurs un aménagement écosystémique et une gestion intégrée des ressources forestières, et contribue en ce sens au développement de la filière des champignons au Québec (MRNF, 2009).

Le système québécois de gestion et d'aménagement forestier a historiquement été fondé sur l'exploitation de la ressource ligneuse, en mettant peu d'emphase sur le potentiel économique que peuvent représenter les produits forestiers non-ligneux (PFNL), dont font partie les champignons comestibles. Leur valeur commerciale s'est pourtant accrue au cours des dernières années (Lamérant *et al.*, 2008), notamment en Colombie-Britannique où plus de 40 espèces de champignons sont maintenant exploitées de façon commerciale (Berch et Cocksedge, 2003). Dans l'Est du pays, le commerce des champignons demeure peu développé, notamment en raison de la rigueur du climat, qui limite la durée de la saison de fructification, à l'absence de traditions mycologiques et à la domination, sur les marchés, des espèces cultivées (Villeneuve, 2000). Une évolution dans les volumes récoltés au Québec a néanmoins été observée, la cueillette étant passée de 5 tonnes en 2006, à 10 à 15 tonnes en 2007, jusqu'à 25 tonnes en 2008, (Biopterre, 2009), soulignant l'intérêt grandissant des consommateurs pour cette ressource.

1.2 CONTEXTE FORESTIER REGIONAL

Au Bas-St-Laurent et dans Chaudière-Appalaches, l'abondance des plantations d'épinettes s'explique notamment par la dernière épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) (*Choristoneura fumiferana*), qui a perduré de 1971 à 1992, et qui s'est traduite par d'importantes coupes de récupération et de prévention du couvert forestier à prédominance de sapin baumier (*Abies balsamea*) (Pominville *et al.*, 1999). La plantation d'arbres non-hôtes de la TBE s'est alors avérée la stratégie optimale afin de rebâtir le capital forestier perdu; aujourd'hui, la moitié du territoire forestier du Bas-St-Laurent est occupé par des peuplements de moins de 40 ans, dont 60% sont des plantations, majoritairement d'épinettes (Müssenberger, 2007). Ces plantations atteignent progressivement l'âge auquel elles doivent subir une éclaircie commerciale, qui sera conséquemment un traitement sylvicole largement répandu au cours des prochaines années dans la région (CREBSL, 2010).

Parallèlement, les plantations d'épinettes sont reconnues pour posséder une bonne productivité de champignons; plus de 75 kg/ha d'espèces comestibles ont été cueillis dans des plantations d'épinettes blanches (*Picea glauca*) du Lac-St-Jean (Gévry, 2010). Des inventaires entrepris dans des plantations d'épinettes blanches et d'épinettes de Norvège (*Picea abies*) du Bas-St-Laurent ont quant à eux permis de recenser des quantités variant de 0,07 à 26 kg/ha pour la Chanterelle commune (*Cantharellus cibarius*), et de 10 à 50 kg/ha pour le Bolet cèpe (*Boletus edulis*) (Biopterre, 2009).

1.3 LES CHAMPIGNONS FORESTIERS

Au Québec, 2745 espèces de champignons ont été répertoriées (Landry, 2011). La nature symbiote d'une importante proportion d'entre elles les rendent difficiles, voire impossibles à cultiver; ces espèces sont obligatoirement associées à une plante hôte via un réseau d'hyphes souterrains, le mycélium. Cette symbiose entre le champignon et les racines des végétaux, qu'on appelle mycorhize, joue un rôle essentiel dans l'écosystème

forestier (Egli et Brunner, 2002 ; Fortin *et al.*, 2008). La plante hôte retire de nombreux avantages de son association avec le champignon, notamment dans l'obtention de nutriments et d'eau. En contrepartie, le champignon, organisme hétérotrophe, reçoit de l'arbre un flux continu en carbone. Les mycorhizes occupent une multitude d'autres rôles fondamentaux dans l'écosystème, notamment en libérant des auxines essentielles à la croissance racinaire, en permettant l'échange de nutriments entre les végétaux reliés par un même mycélium et en assurant une protection à la plante hôte contre divers pathogènes ainsi qu'une résistance accrue aux stress environnementaux (Fortin *et al.*, 2008 ; Simard *et al.*, 1997 ; Ljungquist et Stenstrom, 1983 ; Stenström *et al.*, 1997 ; Perrin, 1985).

La plupart des champignons forestiers comestibles sont ectomycorhiziens (Maneli, 2008), et appartiennent aux groupes des Ascomycètes (Ascomycota) et des Basidiomycètes (*Basidiomycota*). Les ectomycorhizes forment des associations principalement avec les espèces ligneuses, en pénétrant dans leurs racines, mais en demeurant toutefois à l'extérieur des cellules, soit dans l'espace intercellulaire. Ils y forment un réseau d'hyphes, appelé réseau de Hartig, qui assure l'échange des éléments entre l'arbre et le champignon (Egli et Brunner, 2002). Le réseau souterrain de mycélium accomplit sa reproduction sexuée par une fructification, le sporophore, lequel dissémine des millions, voire des milliards de spores d'origine sexuée, qui assureront la reproduction de l'organisme.

1.4 IMPACTS DES TRAITEMENTS SYLVICOLES SUR LA FLORE FONGIQUE

1.4.1 Changement de la végétation

L'impact premier d'une coupe forestière sur les populations mycorhiziennes est bien sûr la perte d'arbres hôtes (Jones *et al.*, 2003). La relation symbiotique entre les arbres et les champignons rendent ces derniers dépendants envers les produits de la photosynthèse des végétaux. Ceci signifie que des activités de prélèvement telles que les coupes et les éclaircies peuvent affecter l'abondance et la composition en espèces des populations fongiques (Durall *et al.*, 2006; Egli et Ayer, 2009; Jones *et al.*, 2003; Kropp et Albee,

1996). La diminution de la densité de racines vivantes dans le sol observée suite à une coupe pourrait ainsi priver les mycorhizes de leur principale source de carbone, ce qui est susceptible d'affecter la production de sporophores (Kropp et Albee, 1996). Un changement dans la composition spécifique des champignons sera par ailleurs observé selon l'âge des arbres résiduels laissés sur le site de coupe. Les associations mycorhiziennes sont dynamiques, c'est-à-dire que l'arbre s'associera avec différentes espèces de champignons au cours de sa vie, de sorte que les champignons ectomycorhiziens peuvent agir à titre d'indicateurs du stade de succession des forêts (Frankland, 1998).

Bien que certains traitements sylvicoles requièrent la récolte de l'hôte, cette perte peut être amoindrie en maintenant des arbres résiduels sur le parterre de coupe. Ces derniers, en autant que l'essence soit appropriée, persisteront dans leur rôle d'hôte, et verront leur croissance augmenter suite à l'apport accru de lumière, d'eau et de nutriments provoqué par l'ouverture du peuplement (Zahner et Withmore, 1960).

Il a été suggéré que les couverts arbustif et herbacé, dont la croissance est possiblement stimulée par l'ouverture de la canopée engendrée par la coupe, peuvent aussi influencer le développement et la fructification des mycorhizes (Villeneuve, 2000). Leur recouvrement affectera la diversité et la répartition spatiale des communautés ectomycorhiziennes (Villeneuve, 2000), par exemple en influençant l'humidité et la température du sol, auxquels les champignons sont particulièrement sensibles.

1.4.2 Condition de substrat et physico-chimie du sol

Les conditions environnementales qui exercent un rôle fondamental dans le développement des champignons, tels que la luminosité, la température et l'humidité du sol, sont grandement altérées par les coupes forestières. La pluie infiltre davantage le sol des peuplements ouverts par les traitements d'éclaircies; cet apport supplémentaire, causé par une diminution de la couverture de la canopée, se traduit par une plus grande réserve d'eau extractible, réduisant ainsi le stress hydrique des végétaux (Bréda *et al.*, 1995). Il existe par ailleurs une corrélation positive entre les précipitations et la production de

sporophores (Eveling *et al.*, 1990 ; Pinna *et al.*, 2010; O'Dell, 1999), l'abondance et la richesse spécifique des champignons ectomycorhiziens pouvant être partiellement expliquées par un gradient d'humidité (O'Dell, 1999). Toutefois, la recolonisation du sol perturbé lors des coupes par les racines d'arbres résiduels et l'augmentation de la masse foliaire de ces derniers, qui se traduisent par une plus grande évapotranspiration, entraînent un retour rapide aux conditions initiales d'humidité (Aussenac et Granier, 1988). L'évapotranspiration est également reliée au rayonnement solaire, qui pénètre davantage les peuplements éclaircis, causant ainsi un assèchement plus rapide du sol (Pilz *et al.*, 2006; Pilz et Molina, 2001) et une augmentation de la température de la litière forestière (Strand, 1968). L'augmentation du rayonnement solaire au sein du peuplement éclairci est proportionnelle au diamètre et à la quantité d'arbres retirés, et se traduit indirectement par une augmentation de la croissance des arbres restants sur le site, pour lesquels la lumière est un facteur moins limitant (Ricklefs et Miller, 2005). Une augmentation de la température du sol peut aussi retarder la date initiale de fructification chez certaines espèces (Pinna *et al.*, 2010). La température atmosphérique agit aussi en ce sens; une augmentation de 1°C correspondrait approximativement à un délai d'une semaine dans la fructification des champignons (Straatsma *et al.*, 2001).

1.4.3 Coupes forestières

Plusieurs études démontrent que les coupes totales tendent à diminuer à la fois l'abondance et la diversité de champignons sur les superficies traitées (Durall *et al.*, 2006; Kropp et Albee, 1996). La diminution de l'allocation en carbone aux ectomycorhizes se traduit effectivement par une réduction de l'abondance des sporophores (Jones *et al.*, 2003), proportionnelle à l'intensité du traitement (Luoma *et al.*, 2004). En plus de freiner la fructification, les coupes totales sont aussi susceptibles d'amener un changement dans la composition de la communauté fongique, en favorisant des espèces plus rudérales, c'est-à-dire moins sensibles aux perturbations. Durall *et al.* (2006) ainsi que Jones *et al.* (2003) suggèrent d'ailleurs que l'impact majeur des coupes totales soit davantage de changer la diversité fongique que de réduire le pourcentage de racines colonisées.

La persistance des ECM suite aux coupes forestières est toutefois très variable. Cette capacité qu'ont certains champignons à survivre au retrait de leur hôte repose entre autre sur leur versalité trophique : bien qu'habituellement considérés comme étant des symbiotes, ces espèces peuvent alternativement s'alimenter par voie saprophytique (Pritsch et Garbaye, 2011). À ce sujet, Giltrap (1982) a observé une production de polyphénols oxydase, une enzyme impliquée dans la décomposition de la lignine, chez certaines espèces de lactaires.

Un moins grand nombre d'études abordent les impacts des traitements sylvicoles moins intensifs tels que les éclaircies et les coupes partielles sur la flore fongique. L'éclaircie commerciale est un traitement fréquemment pratiqué au Québec, qui s'applique aux peuplements résineux généralement équiennes n'ayant pas encore atteint la maturité. Il s'agit d'une coupe partielle qui vise à retirer de 20% à 40% du volume marchand du peuplement, en priorisant le prélèvement des tiges déformées et de moins bonne qualité. En récoltant les arbres les plus opprimés, qui dépérissent en raison de la trop grande densité de tiges, l'éclaircie permet d'améliorer la qualité et la croissance du peuplement forestier résiduel.

Les impacts de tels traitements sur les communautés ecto-mycorhiziennes dépendront de l'étendue de la coupe, de la mortalité des racines, de la croissance des arbres résiduels sur le site et de la sensibilité qu'ont les ECM à fructifier dans des conditions de changements de température et d'humidité du sol (Kranabetter et Kroeger, 2001). Les essences conservées sur le site suite à l'éclaircie devraient par ailleurs être prises en considération, dans la mesure où les champignons mycorhiziens ont parfois des hôtes spécifiques (Egli et Brunner, 2002; Molina *et al.*, 1992).

Les réponses des champignons aux traitements sylvicoles varient aussi grandement selon l'espèce étudiée. Cette variabilité a notamment été démontrée par l'étude de Kropp et Albee (1996), qui concluent que le nombre total de sporophores, toutes espèces confondues, est similaire dans les peuplements éclaircis et les peuplements témoins, avec toutefois des différences de composition de la communauté d'espèce mycorhiziennes. Chez

Boletus edulis, par exemple, un plus grand nombre de sporophores a été observé dans les peuplements éclaircis, ce qui indiquerait que cette espèce n'a pas besoin d'une canopée dense pour maintenir ou augmenter sa productivité, mais plutôt d'un habitat partiellement ouvert et ensoleillé (Salerni et Perini, 2004).

1.5 OBJECTIFS

Considérant l'importance des champignons comestibles en plantations, et l'avènement prochain d'une vague de traitements d'éclaircie commerciale dans ces peuplements au cours des prochaines années, il devient très pertinent de vérifier la productivité des champignons comestibles suite à l'éclaircie. Leur récolte, en plus de contribuer à la diversification des ressources forestières exploitées, pourrait permettre au propriétaire forestier de tirer un revenu supplémentaire de sa forêt, complémentaire à celui obtenu par l'exploitation de la matière ligneuse (Gévry, 2008). Nous avons donc voulu : i) Comparer la productivité des champignons forestiers comestibles entre des plantations d'épinettes éclaircies et non traitées, ii) déterminer les effets environnementaux biotiques et abiotiques de l'éclaircie, et vérifier leurs impacts sur la productivité des champignons forestiers comestibles.

Nous posons l'hypothèse selon laquelle la modification de la densité de ces hôtes dans un peuplement entrainera un changement dans la productivité des ECM. La variation des caractéristiques biologiques et physico-chimiques possiblement entraînée par le traitement d'éclaircie est aussi susceptible d'affecter la flore fongique, très sensible aux conditions environnementales.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 AIRE D'ETUDE

L'aire d'étude couvre le territoire de trois municipalités régionales de comté (MRC), soient celles de l'Islet, Kamouraska et Rivière-du-Loup, dans les régions de Chaudière-Appalaches et du Bas-St-Laurent. Le relief de la région, plutôt accidenté, est principalement constitué de coteaux où les dépôts de till sont dominants (MRNF, 2003; MRNF, 2005). Le relief s'accroît progressivement du fleuve vers le Sud-Est, atteignant une moyenne de 400 m pour la région 3d, alors que les classes 200-300 m et 300-400 m sont les plus abondantes dans la région 4f. Le secteur du lac de l'Est, au Sud, présente quant à lui une altitude qui s'élève à 400-500 m. La température annuelle moyenne est de 2,5°C et les précipitations annuelles se situent globalement entre 900 et 1100 mm, dont 25 à 40 % tombent sous forme de neige (MRNF, 2003; MRNF, 2005). La saison de croissance varie entre 150 et 170 jours sur le territoire couvert par l'étude (MRNF, 2003; MRNF, 2005). Les sites à l'étude se situent dans le sous-domaine bioclimatique de l'Est (MRNF, 2003; MRNF, 2005). Ce secteur chevauche les régions écologiques 4f et 3d, dont les domaines bioclimatiques dominants sont respectivement la sapinière à bouleau jaune et l'érablière à bouleau jaune et où la forêt, principalement composée de peuplements mélangés où le sapin baumier est omniprésent, occupe la majorité de la superficie du territoire.

2.2 SELECTION DES SITES D'ETUDE

Une première sélection des sites à l'étude a été réalisée à l'aide des cartes écoforestières du 3e décennal, où sont répertoriés les peuplements forestiers de la région. Les plantations d'épinettes blanches et les plantations d'épinettes de Norvège âgées de 22 à

50 ans ont été délimitées. Parmi celles-ci, les sites témoins sélectionnés n'ont subi aucun traitement d'éclaircie commerciale à ce jour (n=26), contrairement aux sites qui ont été éclaircis au cours des 6 dernières années (n=24). Finalement, afin de limiter les déplacements, et dans le but de pouvoir visiter un nombre maximal de sites, les plantations répondants aux critères se situant à proximité les unes des autres ont été priorisées.

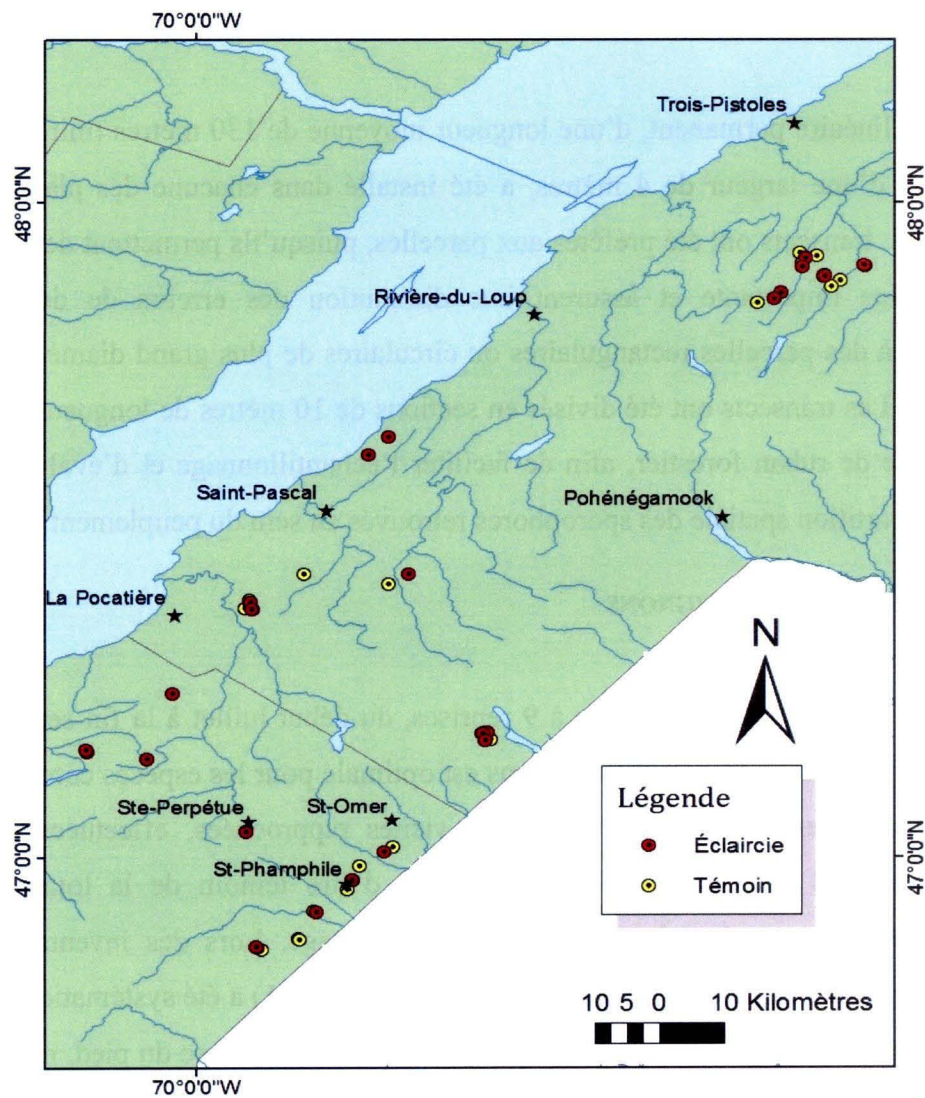


Figure 1 : Localisation des plantations sélectionnées pour l'étude (plantations éclaircies en rouge et plantations témoins en jaune)

2.3 STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE

Un transect linéaire permanent, d'une longueur moyenne de 130 mètres (min.: 80 m, max.: 300 m), et d'une largeur de 4 mètres, a été installé dans chacune des plantations sélectionnées. Les transects ont été préférés aux parcelles, puisqu'ils permettent de couvrir une superficie plus importante et assurent une diminution des erreurs de détection, comparativement à des parcelles rectangulaires ou circulaires de plus grand diamètre (Pilz et Molina, 2001). Les transects ont été divisés en sections de 10 mètres de longueur, toutes délimitées à l'aide de ruban forestier, afin de faciliter l'échantillonnage et d'évaluer plus précisément la répartition spatiale des sporophores retrouvés au sein du peuplement.

2.4 INVENTAIRES DE CHAMPIGNONS

Chacun des transects a été parcouru à 9 reprises, du début juillet à la fin septembre 2011, alors que la fructification des champignons est optimale pour les espèces comestibles à fort potentiel commercial (Gévry, 2008). Ces visites rapprochées, effectuées à une fréquence variant de 8 à 11 jours, nous ont permis d'être témoin de la totalité des fructifications survenues pendant la période d'échantillonnage. Lors des inventaires, le nombre de sporophores des espèces comestibles ciblées (Tableau 1) a été systématiquement noté à chaque section de 10 m. Les sporophores ont été récoltés à la base du pied, nettoyés, puis pesés individuellement à l'aide d'une balance portative (± 0.05 g). L'estimation visuelle de leur état de dégradation (décomposition, consommation par la faune), a aussi été noté sous forme de pourcentage, par tranche de 5% de tissus dégradés ; les individus d'une même espèce présentant un taux comparable de dégradation et retrouvés dans la même section ont pu être pesés simultanément.

Tableau 1 : Espèces de champignons ectomycorhiziens à fort potentiel commercial inventoriées

Nom latin	Nom français, nom commun	Code
<i>Boletus</i> aff. <i>edulis</i> (Bull.) : Fr.	Bolet comestible, Bolet cèpe, Cèpe d'Amérique	BOCE
<i>Catathelasma ventricosum</i> (Peck) Sing.	Armillaire ventru	ARVE
<i>Leccinum piceinum</i> (Pilát) Dermek	Bolet des épinettes	LESP ^a
<i>Leccinum aurantiacum</i> (Bull.) S.F. Gray	Bolet orangé	LESP ^a
<i>Chalciporus piperatus</i> (Bull.):Fr.	Bolet poivré	BOPO
<i>Lactarius deterrimus</i> Gröger	Lactaire des épinettes	LASP ^a
<i>Lactarius thyinos</i> A.H. Sm.	Lactaire saumoné	LASP ^a

^a : Pour des raisons logistiques et taxonomiques, certaines espèces ont été regroupées sous un même code, tel qu'il sera expliqué dans la section 3.1.1

2.5 CARACTERISATION DES SITES D'ETUDE

Une parcelle d'échantillonnage a été implantée de façon adjacente au transect, à sa mi-longueur, afin de caractériser le site. Un échantillon de sol y a été prélevé lors de la première visite sur le terrain, congelé, puis envoyé au laboratoire pour fins de détermination du pH du sol, ainsi que la texture (% limon, sable et argile). Le pH a été déterminé à l'aide un pH-mètre et d'eau déminéralisée, selon le protocole DR-12-VMC «Protocole pour la validation d'une méthode d'analyse en chimie » du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ, 2010a). La granulométrie du sol a quant à elle été déterminée selon la méthode Bouyoucos (CEAEQ, 2010b). Un consigneur de température de type « iButton » a aussi été installé de façon permanente à chacune des parcelles, enfoui à 5 cm dans le sol, afin de révéler les différences de température associées au traitement d'éclaircie. Les thermomètres ont préalablement été programmés pour enregistrer une valeur aux deux heures, durant toute la saison d'échantillonnage, du 1er juillet au 30 septembre 2011. La radiation photosynthétiquement active au sein du peuplement a été mesurée à l'aide d'un senseur BF3, à deux reprises durant la saison d'échantillonnage, nous indiquant la quantité de lumière disponible pour la croissance des végétaux sur le site. La pente, mesurée à l'aide d'un clinomètre, ainsi que le recouvrement (tranches de 5%) par

les débris ligneux et les plantes herbacées au sol ont été notés à toutes les sections de 10 mètres de chacun des transects.

Finalement, la surface terrière et la densité spécifique au sein des plantations étudiées ont pu être déterminées à l'aide des mesures de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des arbres considérés par un prisme (coefficient de 2) à chaque parcelle d'échantillonnage.

3. 3. ANALYSES STATISTIQUES

3.1 EFFETS DU TRAITEMENT D'ÉCLAIRCIE COMMERCIALE SUR LA PRODUCTIVITÉ DES CHAMPIGNONS FORESTIERS COMESTIBLES

3.1.1 Effet du traitement d'éclaircie commerciale sur l'abondance moyenne des champignons forestiers comestibles

L'effet du traitement d'éclaircie commerciale sur l'abondance des champignons forestiers comestibles a été vérifié à l'aide d'un modèle linéaire mixte adapté pour une distribution de Poisson (library Zelig : fonction poisson.mixed), les abondances de champignons étant constituées de nombreuses valeurs de zéro. Le traitement (plantation éclaircie ou témoin) a été considéré comme variable fixe et chaque transect indépendant comme variable aléatoire, précisé par le symbole « | » dans l'équation (Eq.1). La variable dépendante était formée du nombre total de sporophores récoltés, par espèce, dans chaque section de 10 m des transects (Eq 1). Le symbole « ~ » signifie « en fonction de ».

Équation 1: Abondance champignons (spi) ~ Traitement + (1|Transect)

Un modèle a été établi pour chacune des espèces de champignon; toutefois, le Bolet orangé et le Bolet des épinettes ont été regroupés (*Leccinum sp.*, acronyme LESP), tout comme le Lactaire des épinettes et le Lactaire saumoné (*Lactarius sp.*, acronyme LASP). Ce regroupement s'explique par une récolte peu abondante de Bolets orangés et de Lactaires saumonés, et de leur distinction in situ parfois ardue avec des espèces apparentées tel que le Bolet des épinettes et le Lactaire des épinettes respectivement, qui poussent à leurs côtés. Leur biologie similaire, notamment au niveau de la morphologie, de la phénologie et de l'habitat préférentiel (McNeil, 2006), justifient par ailleurs une telle association. Possédant

des propriétés organoleptiques et une valeur marchande similaire, ces espèces sont aussi commercialisées conjointement (Le Gal, communication personnelle). Ces regroupements ont été appliqués à l'ensemble des analyses subséquentes.

3.1.2 Effet du traitement d'éclaircie commerciale sur le poids moyen des champignons forestiers comestibles

Pour vérifier l'influence du traitement d'éclaircie commerciale sur le poids moyen des champignons comestibles récoltés, nous avons réalisé un modèle linéaire mixte, où la date des relevés, les transects indépendants, ainsi que les sections de 10 mètres qui le composent sont les variables aléatoires, et où le traitement (Témoin ou Éclairci) agit comme variable fixe. Un modèle a été établi séparément pour chaque espèce/regroupement (Eq. 2):

$$\text{Équation 2 : } \text{Log}_{10}\text{Poids (spi)} \sim \text{Traitement} + (1 \mid \text{Section/Transect/Date relevé})$$

Seule la masse des sporophores sains, soient ceux présentant un taux de dégradation de 20% et moins, ont été inclus dans le modèle. Ainsi, les champignons impropres à la consommation et à la commercialisation ont été retirés de l'analyse; nous avons de ce fait évité de surévaluer le poids des champignons récoltés, où auraient pu être inclus des champignons de poids élevé, mais grandement décomposé vu leur âge avancé.

3.1.3 Influence du temps écoulé depuis le traitement d'éclaircie

Nous avons voulu savoir si le temps écoulé depuis le traitement d'éclaircie commerciale pouvait avoir un impact sur la productivité des champignons comestibles. Un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis a été réalisé avec les abondances moyennes de sporophores de chacune des espèces de champignons dans les plantations traitées depuis les 5 années précédant les inventaires de 2011.

3.2 RELATION CHAMPIGNON-ENVIRONNEMENT

3.2.1 Effets environnementaux associés au traitement d'éclaircie

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée afin de mettre en évidence les différences de conditions environnementales entre les plantations témoins et les plantations éclaircies. L'ACP inclut l'ensemble des variables environnementales qui respectent les conditions de colinéarité, vérifiées à l'aide de l'indice VIF (variation inflation factor) (Mansfield et Helms, 1982). Ainsi, les variables 1) pourcentage de débris ligneux au sol, 2) pourcentage de plantes herbacées recouvrant le sol, 3) luminosité atteignant le sol, 4) surface terrière du peuplement, 5) pH du sol et 6) texture du sol (pourcentage d'argile et pourcentage de sable) ont été incluses dans l'analyse.

3.2.2 Relation entre les abondances de champignons et les conditions environnementales des sites

Une analyse canonique de redondance (RDA) a été réalisée pour mettre en relation les variables environnementales et les abondances des champignons récoltés. Les données d'abondances ont subi une transformation de Hellinger afin d'atténuer l'influence des espèces faiblement représentées dans l'échantillonnage (Legendre et Gallagher, 2001). La RDA inclut les mêmes variables environnementales que l'ACP, à savoir celles respectant les conditions de colinéarité selon d'indice VIF.

Afin de préciser les résultats obtenus dans la RDA et de comprendre avec plus d'exactitude les impacts individuels des variables environnementales sur la productivité fongique, des modèles ont été établis. Deux modèles linéaires distincts ont dû être réalisés, puisque toutes les variables environnementales n'ont pas été récoltées à la même échelle spatiale; la pente, le recouvrement par les plantes herbacées et le pourcentage de débris ligneux au sol ont été mesurés dans chaque section de 10 mètres des transects, alors que les autres variables n'ont qu'une valeur moyenne par transect.

Ainsi, afin de considérer la variable aléatoire que représente le transect et de contrôler pour la pseudoréplication, nous avons appliqué un modèle linéaire mixte (Eq. 3) adapté à une distribution de Poisson, mettant en relation les abondances totales des différentes espèces de champignons et ces variables environnementales, mesurées dans chaque section.

$$\text{Équation 3 : Abondance champignons (spi)} \sim \text{Débris ligneux} + \text{Recouvrement} \\ \text{Herbacées} + \text{Pente} + (1|\text{Transect})$$

Par la suite, un modèle linéaire simple avec permutations a été réalisé avec les variables environnementales pour lesquelles une seule donnée a été prise par transect, et qui ne présentaient pas de corrélation entre elles, à savoir : l'âge du peuplement, la surface terrière, la température du sol, le pH, la luminosité (PAR), la texture du sol et la température du sol (Eq. 4).

$$\text{Équation 4 : Abondance champignons (spi)} \sim \text{Âge} + \text{Surface terrière} + \text{pH} + \text{PAR} + \\ \text{Texture} + \text{Température du sol}$$

Finalement, à titre exploratoire, plusieurs corrélations de Spearman ont été réalisées afin de révéler le sens de la relation entre les abondances de champignons et les variables environnementales sélectionnées.

3.3 INFLUENCE DE LA COMPOSITION ARBORESCENTE DES PLANTATIONS

Finalement, nous avons voulu savoir lesquelles des plantations d'épinettes blanches, d'épinettes de Norvège ou encore des plantations mixtes étaient les plus productives en champignons forestiers comestibles. Un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis a été réalisé séparément pour chacune de ces compositions arborescentes, avec l'abondance moyenne des sporophores cueillis dans chaque transect.

L'ensemble des analyses a été réalisé avec le logiciel R 2.15.0 (R Development Core Team, 2012).

4. 4. RÉSULTATS

4.1 EFFETS DU TRAITEMENT D'ÉCLAIRCIE COMMERCIALE SUR LA PRODUCTIVITE DES CHAMPIGNONS FORESTIERS COMESTIBLES

4.1.1 Abondances et fréquences relatives

Au total, durant toute la saison d'échantillonnage, 3651 sporophores des espèces ciblées ont été récoltés, dont 2653 dans les plantations témoins, et 998 dans les plantations éclaircies. Parmi les cinq espèces de champignons étudiées, *C.piperatus* domine en abondance absolue (nombre moyen de sporophores à l'hectare) et en abondance relative (nombre de sporophores récoltés par espèce par hectare, divisé par le nombre total de sporophores par hectare, toutes espèces confondues) dans les plantations témoins, alors que *Lactarius sp.* est le groupe le plus abondant (valeur absolue et relative) dans les sites éclaircis (Tableau 2). Les abondances relatives sont sensiblement les mêmes entre les peuplements témoins et éclaircis pour *C.ventricosum*, *B.edulis* et *Leccinum sp.*, alors que le traitement est associé à une diminution de l'abondance relative de *C.piperatus* et une augmentation de celle de *Lactarius sp.* Les résultats du modèle linéaire mixte suggèrent que le nombre moyen de sporophores est significativement plus faible dans les sites éclaircis pour *B.edulis* ($p=5.85 \times 10^{-6}$) et *C.piperatus* ($p=2.47 \times 10^{-7}$), alors qu'une forte tendance est également manifeste chez *C.ventricosum* ($p=0.056$). Bien qu'une diminution ait aussi été observée pour *Leccinum sp.* ($p=0.607$) et *Lactarius sp.* ($p=0.285$) suite au traitement, les résultats ont été trouvés non-significatifs pour ces deux groupes (Tableau 2).

Tableau 2 : Comparaison des abondances absolues et relatives du nombre de sporophores des espèces de champignons forestiers à l'étude entre les plantations d'épinettes témoin et les plantations éclaircies

Espèce	Témoin		Éclaircie commerciale	
	AA ¹	AR ² (%)	AA ¹	AR ² (%)
<i>C. ventricosum</i>	7.594 ^a	4.749	1.465 ^b	2.405
<i>B.edulis</i>	42.912 ^a	26.838	16.911 ^b	27.756
<i>L. piceinum</i>	5.846 ^a	3.656	2.015 ^a	3.307
<i>C. piperatus</i>	65.212 ^a	40.784	8.791 ^b	14.429
<i>L. deterrimus</i>	38.332 ^a	23.973	31.746 ^a	52.104
<i>Total des sporophores</i>	159.896		60.928	

¹AA (abondance absolue) : nombre sporophores récoltés par hectare durant la saison d'échantillonnage

²AR (abondance relative) : nombre de sporophores récoltés par espèce par hectare, divisé par le nombre total de sporophores par hectare, toutes espèces confondues

4.1.2 Poids moyen

L'éclaircie commerciale est associée à une augmentation significative du poids moyen chez *Lactarius sp.* ($p=0.03$) (Figure 2). Une forte tendance est aussi observée pour *B.edulis* ($p=0.06$), mais aucune différence n'a été établie entre les traitements pour les poids de *C.ventricosum* ($p=0.3$), *Leccinum sp.* ($p=0.2$) et *C.piperatus* ($p=0.2$).

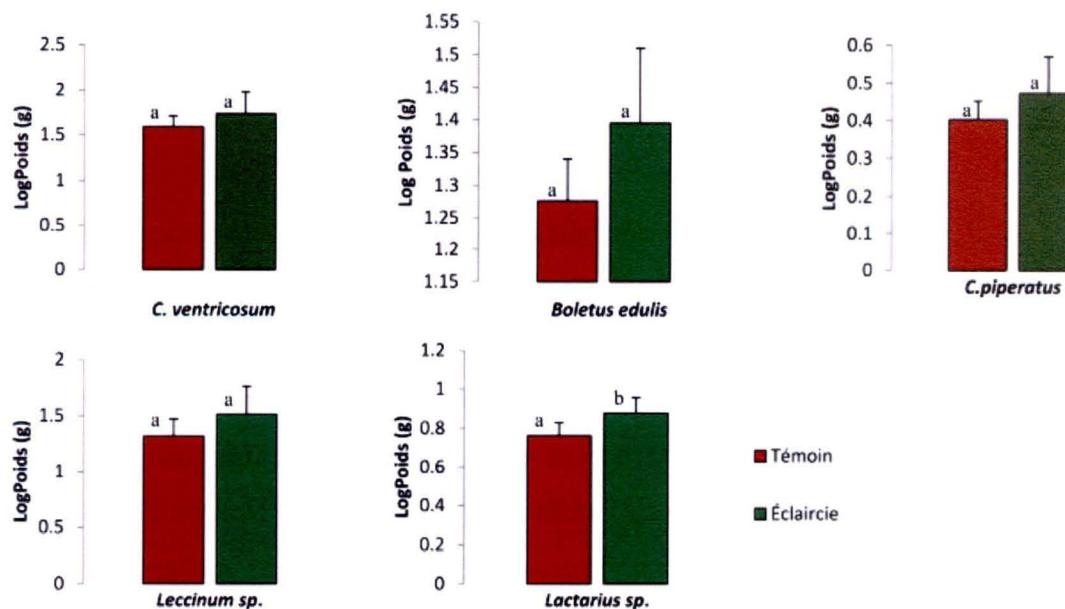


Figure 2 : Poids moyens des sporophores sains (<20% de dégradation) pour les 5 groupes de champignons forestiers comestibles à l'étude, en fonction du traitement

4.1.3 Influence du temps écoulé depuis le traitement d'éclaircie

Les résultats du test de Kruskal-Wallis n'ont révélé aucune influence significative du temps écoulé depuis le traitement sur l'abondance des espèces à l'étude : *C.ventricosum* ($p=0.383$), *B.edulis* ($p=0.265$), *Leccinum sp.* ($p=0.696$), *C.piperatus* ($p=0.165$), *Lactarius sp.* ($p=0.577$). L'abondance des champignons, en termes de nombre de fructifications, ne varie pas entre 1 et 5 ans, ce qui signifie que les plantations qui viennent de subir une éclaircie sont aussi productives que celles ayant été éclaircies il y a déjà plusieurs années (entre 1 et 5 ans).

4.2 RELATION CHAMPIGNON-ENVIRONNEMENT

4.2.1 Analyses en composantes principales

L'analyse en composantes principales des variables environnementales mesurées dans les plantations témoins et éclaircies décrit un espace d'ordination où les deux premiers axes expliquent respectivement 28.01% et 22.37% de la variance. La distribution des sites par rapport au premier axe indique que les plantations éclaircies présentent davantage de débris ligneux au sol, de plantes herbacées et de luminosité. À l'opposé, les plantations témoins présentent une plus grande surface terrière, et un pH de l'horizon B plus élevé. Tel qu'illustré (Figure 3), les plantations témoins et éclaircies se chevauchent dans l'espace, suggérant que les variables environnementales qui y ont été mesurées ne sont pas diamétralement opposées, et présentent plusieurs valeurs communes.

Tableau 3 : Contribution relative, valeurs propres, pourcentage cumulé de la variance expliquée pour chacun des axes (PVE) de l'analyse en composantes principales pour les variables environnementales.

Variables	CODE	Axe 1	Axe 2
Pourcentage de débris ligneux au sol	Debris	1.892	0.409
Pourcentage de recouvrement du sol par les plantes herbacées	Herb	1.793	0.063
Luminosité atteignant le sol (PAR)	Lum	2.551	0.650
Surface terrière du peuplement	SurTer	-2.641	-0.832
Acidité du sol (pH)	ph	-0.932	-0.727
Pourcentage d'argile dans le sol	Argile	1.027	-2.886
Pourcentage de sable dans le sol	Sable	-0.860	2.860
<i>Valeurs propres (eigen values)</i>		1.961	1.566
<i>PVE (%) cumulé</i>		28.010	50.380

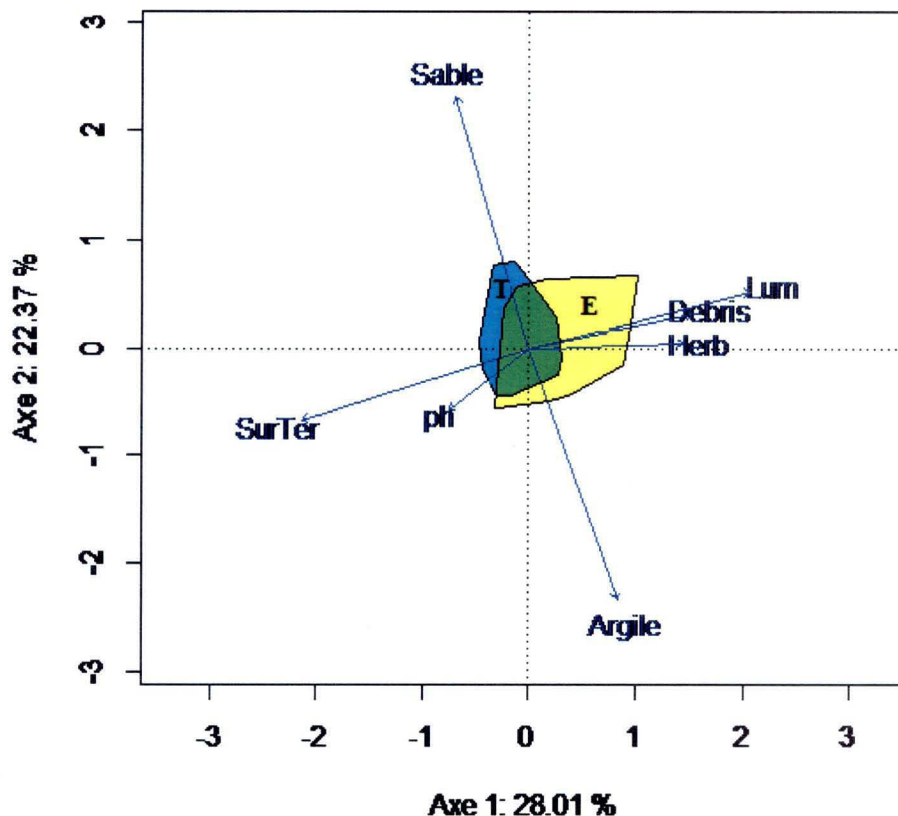


Figure 3 : Analyse en composantes principales incluant les variables environnementales mesurées dans les plantations témoins (T) et les plantations éclaircies (E) (Axe 1 et 2)

4.2.2 Analyse canonique de redondance

L'analyse canonique de redondance, permettant de relier les abondances de champignons aux variables environnementales, présente de faibles pourcentages pour les deux premiers axes (Axe 1= 3.23%, Axe 2=1.53%), signifiant que les abondances des différentes espèces de champignons à l'étude sont peu contraintes par les variables environnementales mesurées (Figure 4). Les axes demeurent malgré tout significatifs ($p < 0.005$), tout comme la totalité des variables environnementales, et le modèle dans son ensemble ($p < 0.005$). Les tendances observées suggèrent que *B.edulis* et *C.piperatus* sont à l'opposé des vecteurs représentant la luminosité, les débris ligneux, les plantes herbacées et le pourcentage d'argile dans le sol, soulignant le peu d'affinité de ces espèces pour ces

caractéristiques environnementales qui sont principalement associées aux plantations éclaircies. *Lactarius sp.* se situe quant à lui à proximité du vecteur représentant le pourcentage de sable, et à l'opposé de la surface terrière, suggérant que cette espèce préfère les peuplements moins denses, avec un bon drainage. Situé au centre de la figure, *C.ventricosum* présenterait peu d'affinité particulière pour l'ensemble des variables sélectionnées. Le vecteur représentant *Leccinum sp.* se superpose quant à lui à l'axe 2, principalement associé au pH et au pourcentage de sable. Cette espèce se trouve toutefois à l'opposé de ces variables, signifiant le peu d'affinités de *Leccinum sp.* pour les sites sablonneux au pH acide (Figure 4).

Tableau 4 : Contribution relative, valeurs propres, pourcentage cumulé de la variance expliquée pour chacun des axes (PVE) de l'analyse canonique de redondance, mettant en relation les variables environnementales et les abondances de champignons

Variables	CODE	Axe 1	Axe 2
Variables environnementales			
Pourcentage de débris ligneux au sol	Debris	0.4592	-0.393
Pourcentage de recouvrement du sol par les plantes herbacées	Herb	0.5873	0.1637
Luminosité atteignant le sol (PAR)	Lum	0.4416	-0.4157
Surface terrière du peuplement	SurTer	-0.7091	-0.3327
Acidité du sol (pH)	pH	-0.2824	0.5218
Pourcentage d'argile dans le sol	Argile	0.3197	-0.1097
Pourcentage de sable dans le sol	Sable	0.1443	0.2559
Abondances de champignons			
<i>C. ventricosum</i>	ARVE	-0.06211	0.28816
<i>B.edulis</i>	BOCE	-0.68872	0.08058
<i>Leccinum sp.</i>	BOEP	-0.01823	-0.30618
<i>C. piperatus</i>	BOPO	-1.07205	0.50903
<i>Lactarius spé</i>	LAEP	0.77972	0.78684
<i>Valeurs propres (eigen values)</i>		0.164732	0.08375
<i>PVE (%) cumulé</i>		3.2304	4.7642

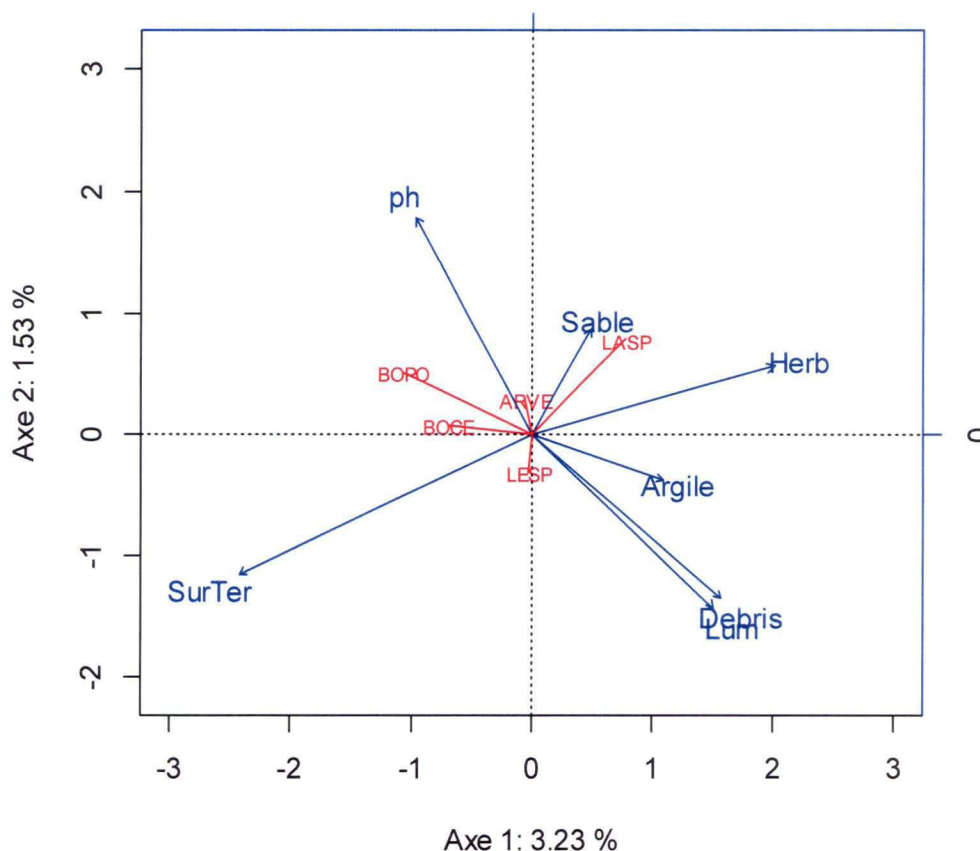


Figure 4 : Diagramme de dispersion des champignons forestiers comestibles à l'étude (en rouge) selon les deux premiers axes de l'analyse canonique de redondance des variables environnementales sélectionnées

4.2.3 Modèles linéaires mettant en relation l'abondance des champignons forestiers comestibles et les variables environnementales

La pente du terrain est généralement corrélée de façon positive avec l'abondance des champignons, sauf pour *C.piperatus* (Tableau 5). Les faibles coefficients de corrélation observés pourraient être liés aux pentes peu prononcées sur lesquelles ont été établies les plantations. Ceci suggère qu'une faible pente influence de manière significative les abondances de champignons, à l'exception de *B.edulis* (tableau 5), pour qui ce facteur a peu d'impact.

Il y a généralement une corrélation négative entre le recouvrement par les plantes herbacées et les abondances de champignons sauf pour *Lactarius sp.*, qui a une relation

positive avec cette variable (Tableau 5). L'effet des herbacées sur la productivité des champignons est par ailleurs hautement significatif pour l'ensemble des espèces (Tableau 5).

Les corrélations de Spearman entre les débris ligneux et les abondances de champignons sont aussi négatives pour toutes les espèces, mettant en évidence l'impact négatif de la matière ligneuse accumulée au sol sur la productivité des champignons (Tableau 5). Le modèle linéaire mixte établit une influence significative de cette variable sur *C.ventricosum*, *B.edulis* et *C.piperatus*, à savoir les trois espèces dont l'abondance a été trouvée significativement plus faible suite à l'éclaircie, alors que *Leccinum sp.* et *Lactarius sp.* semblent moins affectés par les débris ligneux (Tableau 5).

Tableau 5 : Valeurs de p des facteurs fixes inclus dans le modèle linéaire mixte mettant en relation le nombre total de sporophores des différentes espèces de champignons et les variables environnementales. Entre parenthèses : le sens de la relation entre le champignon et la variable étudiée, vérifié à l'aide d'une corrélation de Spearman

Esèce	Pente	Herbacées	Débris
<i>C. ventricosum</i>	0.0144 (+)	4.11 x 10⁻¹⁰ (-)	5.19 x 10⁻⁷ (-)
<i>B.edulis</i>	0.98 (+)	1.35 x 10⁻⁷ (-)	3.53 x 10⁻⁹ (-)
<i>Leccinum sp.</i>	0.001 (+)	0.0024 (-)	0.7 (-)
<i>C. piperatus</i>	1.12 x 10⁻¹⁵ (-)	2.91 x 10⁻⁵ (-)	2.48 x 10⁻⁵ (-)
<i>Lactarius sp.</i>	3.36 x 10⁻¹⁰ (+)	4.62 x 10⁻⁶ (+)	0.996 (-)

L'acidité du sol a peu d'impact sur la productivité de la majorité des espèces, à l'exception de *Leccinum sp.*, dont l'abondance est significativement corrélée de manière négative avec cette variable (Tableau 6). La luminosité au sol a un impact significatif sur *C.ventricosum* et *Lactarius sp.*, dont l'abondance diminue au sein du peuplement. La surface terrière a quant à elle peu d'influence sur la productivité des champignons sauf chez *Leccinum sp.* dont l'abondance augmente en fonction de la surface terrière. La texture du sol ne semble avoir aucune influence sur la productivité des champignons. L'âge du

peuplement est négativement corrélé avec l'abondance de la majorité des espèces; ces corrélations et l'influence de cette variable dans le modèle linéaire sont significatives pour *B.edulis*, *C.piperatus* et *Lactarius sp.* Ces espèces seraient conséquemment plus productives dans les peuplements plus jeunes de la tranche d'âge sélectionnée pour la présente étude. Finalement, la température du sol influence positivement la productivité de *Leccinum sp.*, selon le modèle réalisé, alors qu'elle n'a aucune influence significative chez les autres espèces étudiées (Tableau 6).

Tableau 6 : Valeur de p des facteurs fixes inclus dans le modèle linéaire simple mettant en relation le nombre total de sporophores des différentes espèces de champignons et les variables environnementales, sans pseudoréplication. Entre parenthèses : sens de la relation entre le champignon et la variable, selon un test de corrélation de Spearman

Espèce	pH	Lumière	Surface			Âge	T°sol
			terrière	Argile	Limon		
<i>C. ventricosum</i>	0.473 (-)	0.055 (-)	0.189 (-)	0.391 (+)	0.072 (-)	0.521	0.38 (-)
<i>B.edulis</i>	0.706 (+)	0.092 (-)	0.268 (+)	0.128 (-)	0.42 (-)	0.03	0.241 (-)
<i>Leccinum sp.</i>	0.005 (-)	1 (+)	0.012 (+)	0.686 (+)	0.882 (+)	0.765 (+)	0.036 (+)
<i>C. piperatus</i>	0.433 (+)	0.091 (-)	0.824 (+)	0.615 (-)	1 (-)	0.013 (-)	0.961 (-)
<i>Lactarius sp.</i>	0.902 (+)	0.054 (-)	0.619 (-)	0.51 (+)	0.843 (-)	0.007 (-)	0.093 (-)

4.2.4 Influence de la composition arborescente des plantations

Les résultats du test de Kruskal-Wallis nous révèlent que la composition arborescente de la plantation d'épinettes a peu d'influence sur la productivité des champignons. Les différences d'abondance entre les plantations d'épinettes blanches, d'épinettes de Norvège et les plantations mixtes ont été trouvées non-significatives pour l'ensemble des espèces à l'étude : *C.ventricosum* (p=0.255), *B.edulis* (p=0.766), *Leccinum sp.* (p=0.865), *C.piperatus* (p=0.269), *Lactarius sp.* (p=0.502). Ces résultats suggèrent que les champignons forestiers comestibles ont des affinités similaires pour ces deux hôtes spécifiques.

5. DISCUSSION

En s'appuyant sur les données récoltées au cours de l'été et de l'automne 2011, notre étude démontre que le traitement d'éclaircie commerciale entraîne un changement dans les conditions environnementales du milieu, notamment en termes de luminosité et de débris ligneux, tel qu'illustré dans l'analyse en composantes principales. En permettant une meilleure croissance des plantes herbacées sur le parterre forestier, l'éclaircie a aussi contribué à la modification des caractéristiques des communautés végétales du peuplement. Ces changements au niveau de la strate herbacée, combinés à la diminution de la surface terrière entraînée par le retrait d'une importante proportion des tiges du peuplement, sont susceptibles d'influencer la physiologie des arbres résiduels et des conditions environnementales au sein du peuplement.

Puisque la symbiose entre l'arbre et le champignon rend ce dernier dépendant des produits de la photosynthèse, et considérant la sensibilité des mycètes aux variations des conditions environnementales (Pinna *et al.*, 2010), notre hypothèse de départ, voulant que l'abondance des champignons forestiers comestibles soit modifiée par le traitement d'éclaircie, est supportée.

5.1 DIMINUTION DU NOMBRE DE SPOROPHORES DANS LES PLANTATIONS SUITE A L'ECLAIRCIE COMMERCIALE

Le modèle linéaire mixte a permis de démontrer que le traitement d'éclaircie commerciale a entraîné une diminution significative du nombre moyen de sporophores pour deux des trois espèces de *Boletaceae* à l'étude, à savoir *B.edulis* et *C.piperatus*. La baisse de la productivité des ECM observée suite au traitement sylvicole corroborent d'autres travaux réalisés en Europe et en Amérique du Nord (Luoma *et al.*, 2004; Kropp et Albee,

1996; Pilz *et al.*, 2006). *B.edulis* apparait particulièrement sensible aux perturbations puisqu'elle peut complètement disparaître suite aux traitements sylvicoles, même à faible intensité (Kropp et Albee, 1996).

Bien qu'une tendance à la baisse pour les abondances de *C.ventricosum*, *Leccinum sp.* et *Lactarius sp.*, ait aussi été observée après l'éclaircie, aucune différence significative entre les traitements n'a été mise en évidence pour ces espèces. Un impact mineur de l'éclaircie a aussi été noté par Shaw (2003) sur une majorité d'espèces de champignons à l'étude, et ce malgré une croissance accrue des arbres résiduels sur le site, suggérant que l'augmentation de leur activité photosynthétique ne se traduit pas nécessairement par une productivité accrue du nombre de sporophores.

Le choix de la variable déterminante (avec ou sans éclaircie commerciale), dictée par les pratiques sylvicoles courantes, s'est toutefois avéré contraignant. Il aurait effectivement été intéressant de mesurer les impacts de différents degrés d'éclaircie, notamment pour vérifier si les traitements de plus faible intensité que ceux actuellement prescrits auraient pu avoir un impact moindre sur la productivité fongique. Ceci soulève également la question à savoir si d'autres types de traitements, tel que l'élagage, pourraient conduire à des résultats différents que ceux observés dans le présent travail.

Comme les plantations d'épinettes sont des milieux très homogènes, peu de différences ont été observées entre les sites témoins et éclaircis pour plusieurs des variables environnementales mesurées. C'est notamment le cas du pH et de la texture du sol, tel qu'observé aussi par Martinez-Pena *et al.* (2012) et Kropp et Albee (1996). Cette homogénéité des conditions physico-chimiques du substrat a permis de mettre en évidence l'effet du traitement d'éclaircie sur la productivité, sans toutefois nous permettre de comprendre quels facteurs environnementaux influent sur les abondances des champignons récoltés. Toutefois, certaines des variables mesurées, tel que le pourcentage de débris ligneux et de plantes herbacées au sol, la luminosité du peuplement et la surface terrière varient grandement entre les plantations traitées et éclaircies, comme l'illustre l'analyse en

composantes principales; ces variables ont par ailleurs une influence significative sur la majorité des abondances de champignons (Tableaux 5 et 6).

Les champignons forestiers sont des organismes fugaces, très sensibles aux conditions environnementales, notamment à la température ambiante et aux précipitations; leur productivité peut conséquemment varier considérablement d'une année à l'autre (Pinna *et al.*, 2010). Ce projet ne s'étant échelonné que sur une seule saison de croissance, il nous est impossible de mesurer l'effet de cette variabilité interannuelle sur la productivité des champignons récoltés. Toutefois, l'été et l'automne 2011 ont été reconnus comme étant une période très productive pour les mycètes, selon le spécialiste Dr.J.André Fortin (Cliche, 2011), possiblement en raison des températures légèrement au-dessus de la moyenne saisonnière et des précipitations nettement plus abondantes que la moyenne au cours des mois de juillet, août et septembre (Environnement Canada, 2012).

5.1.1 Impact de l'augmentation des débris ligneux et de la luminosité au sol

Les débris ligneux ont été trouvés en plus grande quantité sur le sol des plantations éclaircies, puisque les résidus de coupe, tel que les branches des arbres abattus, sont généralement laissés au sol. L'impact négatif de cette variable sur l'abondance des champignons peut être partiellement expliqué par certaines modifications du micro-climat entraînées par les débris, notamment au niveau de l'humidité et de la température du sol (Stevens, 1997), deux variables auxquelles les champignons sont particulièrement sensibles (Pinna *et al.*, 2010). Bien que les débris ligneux soient susceptibles de protéger les ECM lors de périodes de sécheresse en maintenant l'humidité dans le sol, l'effet est moindre lorsque seules les branches sont laissées sur le site et que les plus gros débris, tel que les troncs, sont retirés (Stevens, 1997), comme c'est le cas lors d'une éclaircie commerciale. Dans le cadre de notre étude, nous ne disposons toutefois pas de l'équipement requis pour mesurer l'effet des débris ligneux sur le maintien de l'humidité du sol, limitant ainsi les conclusions que nous pouvons tirer sur l'impact précis de cette variable sur la productivité fongique.

En ce qui concerne la température du sol, aucune différence significative n'a été trouvée entre les plantations témoins et éclaircies, malgré une augmentation significative de la luminosité suite au traitement. Ces résultats suggèrent que les débris ligneux ont permis d'atténuer l'effet thermique découlant de l'augmentation du rayonnement solaire. La profondeur des thermomètres installés dans le sol pourrait cependant expliquer la faible variation de la température entre les sites. Peredo *et al.* (1983) précisent par ailleurs que l'une des variables environnementales influençant le plus la production de *Suillus luteus* est la température du sol.

Finalement, nous pensons que les débris ligneux ont pu représenter un obstacle physique à la fructification des champignons. Une accumulation de plusieurs dizaines de centimètres de débris ligneux a possiblement pu freiner la fructification et le développement du sporophore dans l'espace.

5.1.2 Présence d'herbacées

En créant une ouverture dans le peuplement, l'éclaircie commerciale stimule le développement des herbacés dans le sous-bois (Suzuki et Hayes, 2003). Cette variable a influencé significativement toutes les espèces de champignons à l'étude, l'abondance moyenne des sporophores ayant diminué avec l'augmentation du recouvrement par les herbacées; seul *Lactarius sp.* est corrélé positivement avec cette variable. La présence de plantes herbacées dans le peuplement forestier, accompagnées d'un cortège fongique de type arbusculaire plutôt qu'ectomycorhizien (Fortin *et al.*, 2008), est aussi susceptible d'éliminer les communautés d'ECM (Jones *et al.*, 2003), ou encore d'en diminuer la richesse spécifique (Kranabetter et Kroeger, 2001).

Une compétition entre les mycorhizes a effectivement déjà été observée (Duchesne *et al.*, 1987; Wu *et al.*, 1999) où le développement d'une mycorhize fut inhibée par des composés chimiques exudés par un autre champignon ou par la plante hôte. Une compétition entre les mycorhizes pour l'obtention des carbohydrates fournis par l'arbre est aussi possible (Duchesne *et al.*, 1987; Lodge et Wentworth, 1990). Le développement, la

croissance et la survie des ECM étant affectés par les plantes herbacées (Amaranthus et Perry, 1994; Harvey *et al.*, 1997), il a été suggéré que leur éradication pouvait améliorer le développement et la diversité des ECM dans le milieu (Jones *et al.*, 1996; Baar et Kuyper, 1998). Plus indirectement, la présence d'herbacées limite la croissance des arbres et d'arbustes auxquels sont associés les ectomycorhizes, diminuant conséquemment l'abondance de ces derniers au sein du peuplement (Amaranthus et Perry, 1994).

5.2 LA SURFACE TERRIERE, L'ACTIVITE PHOTOSYNTHETIQUE DES ARBRES ET LES CONDITIONS DU SOL

L'activité photosynthétique des arbres demeure un élément clé dans la réponse biologique des champignons mycorhiziens au traitement d'éclaircie, puisque ceux-ci dépendent directement du transfert des photosynthétats fournis par l'arbre afin de prolonger leur mycélium dans le sol et de produire les sporophores essentiels à leur reproduction sexuée (Egli, 2011). L'éclaircie commerciale permet une meilleure croissance des arbres résiduels, en leur permettant d'accéder à davantage de ressources. Toutefois, bien que cette croissance accrue puisse possiblement se traduire par un plus grand transfert de photosynthétats aux champignons associés, les résultats obtenus nous laissent plutôt croire que la perte d'un grand nombre d'hôtes, associé à une diminution des racines actives dans le sol, peut expliquer une baisse de productivité des champignons dans les plantations éclaircies (Kropp et Albee, 1996). La diminution ou l'interruption du flux de carbohydrates de l'arbre vers ses racines affecte directement la productivité nette de sporophores (Egli, 2011).

Par ailleurs, il a récemment été démontré que, suite à un traitement d'éclaircie commerciale, les arbres résiduels présentent une croissance moindre lorsque reliés, par une greffe racinaire, à une souche d'arbre coupé (Tarrow *et al.*, 2010). La souche peut en effet survivre jusqu'à deux ans après traitement, en accaparant les carbohydrates produits par les arbres résiduels (Fraser *et al.*, 2006). Ces mêmes photosynthétats étant essentiels au développement et la fructification des champignons ectomycorhiziens, il serait justifié de

penser que ceux-ci seraient moins productifs lorsqu'associés à un arbre qui partage son réseau racinaire avec une souche.

Finalement, la compaction du sol suite au passage de la machinerie forestière dans les peuplements éclaircis peut diminuer la taille des pores du sol, limitant la pénétration des racines dans le sol et la formation de radicelles auxquelles sont associés les mycorhizes (Amaranthus *et al.*, 1996). La dégradation plus générale de la structure du sol par les coupes forestières peut aussi limiter la circulation d'oxygène dans le sol, ce qui est à même de diminuer l'abondance et la diversité des champignons mycorhiziens qui s'y trouvent (Amaranthus *et al.*, 1996).

5.3 AUGMENTATION DU POIDS DES CHAMPIGNONS DANS L'ÉCLAIRCIE COMMERCIALE

Les éléments de réponse pouvant expliquer l'augmentation des poids moyen de *B.edulis* et *Lactarius sp.* suite au traitement d'éclaircie sont peu élaborés dans la littérature scientifique. L'éclaircie entraîne une ouverture du peuplement, et permet ainsi à davantage de pluie d'atteindre le sol; cet élément peut nous laisser croire que les champignons cueillis dans les sites traités sont susceptibles d'avoir absorbé davantage d'eau, ce qui aurait augmenté leur poids à l'état frais. Pour vérifier cette hypothèse, un séchage de ces mêmes champignons - ou à tout le moins d'un échantillon minimal - suivi d'une seconde pesée, auraient été nécessaires. Procédant de la sorte, Pilz *et al.* (2006) ont observé une diminution du poids moyen des chanterelles communes suite à une éclaircie. Toutefois, dans un objectif de commercialisation de la ressource, le poids frais demeure le plus important à considérer.

L'augmentation du poids moyen chez ces deux espèces dans les sites éclaircis ne suffit toutefois pas à compenser la diminution importante du nombre de sporophores récoltés dans les plantations traitées, tel que démontré précédemment dans le modèle linéaire mixte. Ainsi, les masses récoltées à l'hectare demeurent plus importantes dans les plantations témoins, et ce pour l'ensemble des espèces de champignons à l'étude.

6. CONCLUSION GÉNÉRALE

L'offre des champignons forestiers comestibles sur les marchés et l'intérêt grandissant de la population pour cette ressource survient dans un contexte de crise forestière québécoise et constitue, en ce sens, une avenue prometteuse vers la diversification des ressources forestières, pouvant stimuler l'économie des régions. Dans ce contexte, les résultats obtenus dans notre étude pourraient être intégrés aux stratégies d'aménagements forestiers régionales et au développement d'un réseau de commercialisation des champignons dans l'Est du Québec. Concrètement, l'occurrence élevée des champignons comestibles dans les plantations non-éclaircies suggère des développements possibles pour la mise en valeur de la ressource, et pourrait nous permettre d'orienter les réseaux de cueilleurs dans ces peuplements plus productifs.

Les inventaires hebdomadaires réalisés dans le cadre de ce projet de recherche ont permis de confirmer l'abondance de la ressource fongique dans les plantations d'épinettes, nombreuses sur le territoire bas-laurentien. Le suivi de transects permanents, à une fréquence élevée, a été l'occasion d'être témoin de la quasi-totalité des émergences de champignons comestibles survenus au cours de la saison de fructification, et conséquemment de mettre en évidence les effets du traitement d'éclaircie sur la productivité fongique. Le nombre élevé de parcelles et l'abondance des fructifications récoltées ont permis d'effectuer des analyses statistiques révélant les facteurs biotiques et abiotiques qui influencent la productivité des champignons ; la pente, les débris ligneux et les plantes herbacées au sol ont été les variables ayant eu le plus grand impact sur l'abondance des champignons à l'étude. En ce sens, les objectifs du projet, visant à i) comparer la productivité des champignons forestiers comestibles entre des plantations d'épinettes éclaircies et non traitées et à ii) déterminer les effets environnementaux

biotiques et abiotiques de l'éclaircie, et leurs impacts sur la productivité des champignons forestiers comestibles, ont été atteints. Notre hypothèse de départ, selon laquelle la modification de la densité des hôtes dans un peuplement entraînera un changement dans la productivité des ECM a aussi été confirmée puisque nos résultats suggèrent que l'éclaircie commerciale entraîne une diminution de l'abondance de certaines des espèces de champignon à l'étude. Le Bolet cèpe et le Bolet poivré ont effectivement vu leur abondance diminuer de manière significative suite au traitement.

Des stratégies sylvicoles minimisant plus particulièrement les impacts sur la productivité et la diversité fongique, notamment afin de maintenir une bonne productivité de la forêt à long terme, demeurent à développer. La « mycosylviculture », un concept développé en Europe, vise à orienter la gestion forestière en ce sens, en promouvant des traitements sylvicoles qui permettront de conserver, voire améliorer la productivité des champignons sylvestres (Martinez Pena, 2011). La mycosylviculture implique des méthodes concrètes, telles que la promotion d'une régénération rapide suite à la perturbation, en favorisant une grande diversité d'espèces autochtones dont les plants ont été préalablement mycorhizés avant la reforestation. La conservation d'une surface terrière minimale et d'une proportion d'arbres matures, porteurs de mycorhizes, sur le site de coupe, de même que le maintien d'une diversité des écosystèmes forestiers de différentes classes d'âge font aussi partie des méthodes sylvicoles qui sont susceptibles de favoriser la productivité fongique. Davantage d'études, sur une plus grande période de temps, seront nécessaires afin d'évaluer les effets à plus long terme des traitements sylvicoles sur la productivité fongique. Des recherches scientifiques supplémentaires sur les champignons forestiers comestibles permettront d'autre part de stimuler le développement et la mise en valeur de cette ressource en région.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amaranthus M.P., D. Page-Dumroese, A. Harvey, E. Cazares et L.F. Bednar, 1996. Soil compaction and organic matter removal affect conifer seedling nonmycorrhizal and ectomycorrhizal root tip abundance and diversity. Res. Pap. PNW-RP-494. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 12 p.
- Amaranthus M.P. et D.A. Perry, 1994. The functioning of ectomycorrhizal fungi in the field: linkages in space and time. *Plant and Soil* 159: 133-140.
- Aussenac G. et A. Granier, 1988. Effects of thinning on water stress and growth in Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 18:100-105.
- Baar J. et T.W. Kuyper, 1998. Restoration of aboveground ectomycorrhizal flora in stands of *Pinus sylvestris* (Scots Pine) in The Netherlands by removal of litter and humus. *Restoration Ecology* 6 (3): 227–237.
- Berch S.M. et W. Cocksedge, 2003. Commercially important wild mushrooms and fungi of British Columbia: what the buyers are buying. British Columbia Ministry of forests, Research Branch, Victoria, B.C. Technical report 006. 11 p.
- Biopterre, 2009. Analyse de commercialisation des champignons forestiers sauvages à potentiel commercial du Québec. Projet AF-08-021, La Pocatière, Québec. 78 p. +annexes.
- Bréda N., A. Granier et G. Aussenac, 1995. Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Tree Physiology* 15: 295-306.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), 2010a. Détermination du pH : méthode électrométrique, MA. 100 – pH 1.1, Rév. 2. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. 11 p.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), 2010b. Détermination de la granulométrie, MA. 100 – Gran. 2.0. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. 11 p.

- Cliche J.-F., 2011. Des champignons à la tonne. Le Soleil. Québec. En ligne : URL : <http://blogues.lapresse.ca/sciences/2011/08/17/des-champignons-a-la-tonne/> 17 août 2011.
- Conférence régionale des élu(e)s du Bas-St-Laurent (CREBSL), 2010. Plan régional de développement intégré des ressources et du territoire (PRDIRT), Bas-St-Laurent. 242 p.
- Duchesne L.C, R.L. Peterson et B.E Ellis, 1988. Pine root exudate stimulates the synthesis of antifungal compounds by the ectomycorrhizal fungus *Paxillus involutus*. *New Phytologist* 108: 471-476.
- Durall D.M., S. Gamiet, S.W. Simard, L. Kudrna et S.M Sakakibara, 2006. Effects of clearcut logging and tree species composition on the diversity and community composition of epigeous fruit bodies formed by ectomycorrhizal fungi. *Canadian Journal of Botany* 84: 966–980.
- Egli S., 2011. Mycorrhizal mushroom diversity and productivity—an indicator of forest health? *Annals of Forest Science* 68: 81–88.
- Egli S. et F.Ayer, 2009. Thinning an old-growth forest increased diversity and productivity of mushrooms. *Acta Botanica Yunnanica* 16: 62-68.
- Egli S. et I. Brunner, 2002. Les mycorhizes, une fascinante biocénose en forêt. Institut fédéral de recherches WSL 35. 8 p.
- Environnement Canada, 2012. Archives nationales d'information et de données climatologiques. [En ligne], URL : <http://www.climate.meteo.gc.ca>
- Eveling D.W., R.N. Wilson, E.S Gillespie et A. Bataillé, 1990. Environmental effects on sporocarps counts over fourteen years in a forest area. *Mycological Research* 94: 998-1002.
- Fortin J.A., C. Plenchette et Y. Piché, 2008. Les mycorhizes, la nouvelle révolution verte. Éditions Multimondes et Éditions Quae. Québec. 131 p.
- Frankland J.C., 1998. Fungal succession – unravelling the unpredictable. *Mycological Research* 102(1) : 1-15.
- Fraser E.C, V.J Lieffers et S.M. Landhäusser, 2006. Carbohydrate transfer through root grafts to support shaded trees. *Tree Physiology* 26: 1019–1023.
- Gévry M.-F., 2010. Évaluation du potentiel en champignons forestiers comestibles au Lac St-Jean, Mashteuiatsh. Québec. 54 p.
- Gévry M.-F., 2008. Projet d'intégration de la récolte des champignons forestiers comestibles dans la communauté - Secteur de Mont-Louis : description du

projet, résultats des inventaires et perspectives d'avenir locales. Comité de bassin de la rivière Mont-Louis, Mont-Louis, Québec. 65 p. + annexes.

- Giltrap N.J., 1982. Production of polyphenol oxidases by ectomycorrhizal fungi with special reference to *Lactarius* spp. Transactions of the British Mycological Society 78 : 75 :81.
- Harvey A.E, D.S Page-Dumroese, M.F. Jurgensen, R.T. Graham et J.R. Tonn, 1997. Site preparation alters soil distribution of roots and ectomycorrhizae on outplanted western white pine and Douglas-fir. Plant and Soil 188: 107-117.
- Jones M.D., D.M. Durall et W.G. Cairney, 2003. Ectomycorrhizal fungal communities in young forest stands regenerating after clearcut logging. Tansley review. New Phytologist 157: 399-422.
- Jones M.D., D.M. Durall et S.W. Simard, 1996. Ectomycorrhiza formation on Lodgepole pine seedlings as affected by site preparation on a dry grassy site in the IDF zone of the Lilloet forest district. Forest Resource Development Agreement (FRDA), British Columbia, Research Memo 233.
- Kranabetter J.M. et P. Kroeger, 2001. Ectomycorrhizal mushroom response to partial cutting in a western hemlock-western redcedar forest. Canadian Journal of Forest Research 31: 978–987.
- Kropp B.R. et S. Albee, 1996. The effects of silvicultural treatments on occurrence of mycorrhizal sporocarps in a *Pinus contorta* forest: a preliminary survey. Biological Conservation 78 : 313-318.
- Lamérant G., F. Lebel, G. Langlais et A.Vézina, 2008. Mise en valeur des produits forestiers non ligneux. CEPAF, La Pocatière. 181 p.
- Landry J., 2011. Page consultée le 16 mai 2011. Les champignons du Québec, [En ligne], URL : <http://www.mycoquebec.org/bienvenue.php>.
- Le Gal, G., 2013. Communication personnelle.
- Legendre P. et E.D. Gallagher, 2001. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. Oecologia 129 : 271–280.
- Ljungquist P.O. et E. Stenstrom, 1983. Indole-3-acetic acid production by mycorrhizal fungi determined by gas chromatography-mass spectrometry. New Phytologist 94: 401-407.
- Lodge D.J. et T.R. Wentworth, 1990. Negative associations among VA-mycorrhizal fungi and some ectomycorrhizal fungi inhabiting the same root system. Oikos 57: 347-356.

- Luoma D.L., J.L. Eberhart, R. Molina et M.P. Amaranthus, 2004. Response of ectomycorrhizal fungus sporocarp production to varying levels and patterns of green-tree retention. *Forest Ecology Management* 202: 337–354.
- Maneli D., 2008. *Écologie des champignons ectomycorhiziens comestibles en peuplements de pin gris (Pinus Banksiana)*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal. 74 p.
- Mansfield R.E et B.P Helms, 1982. Detecting multicollinearity. *The American Statistician* 36 (3a): 158-160.
- Martínez-Peña F., S. de-Miguel, T. Pukkala, J.A. Bonet, P. Ortega-Martínez, J. Aldea et J. Martínez de Aragón, 2012. Yield models for ectomycorrhizal mushrooms in *Pinus sylvestris* forests with special focus on *Boletus edulis* and *Lactarius group deliciosus*. *Forest Ecology and Management* 282:63-69.
- Martinez Pena F., J.A Oria de Rueda et T.Agredda, 2011. *Manual para la gestion del recurso micologico forestal en Castilla y Leon*. Manuel de gestion. Éditions SOMACYL, Castilla y Leon. 451 p.
- McNeil R., 2006. *Le grand livre des champignons de l'est du Québec*, Éditions Michel Quintin, Waterloo, Ont. 575 p.
- Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF), 2009. *Projet de loi no 57. Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier*. Québec. 112 p.
- Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF), 2008. *La forêt, pour construire le Québec de demain*. Québec. 73 p.
- Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF), 2005. *Guide de reconnaissance des types écologiques : Région écologique 3d, Coteau des basses Appalaches*. Direction des inventaires forestiers. Québec. 186 p.
- Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF), 2003. *Guide de reconnaissance des types écologiques : Région écologique 4f, Collines des moyennes Appalaches*. Direction des inventaires forestiers. Québec. 176 p.
- Molina R., H. Massicotte, et J.M. Trappe, 1992. Specificity phenomena in mycorrhizal symbioses: community-ecological consequences and practical implications, p. 357-423. Dans: Allen M.F., 1992. *Mycorrhizal Functioning: An Integrative Plant-fungal Process*. Chapman and Hall, New York, 541 p.
- Müssenberger F., 2007. *Les plantations résineuses du Bas-St-Laurent; comment les convertir en futaies irrégulières*. La forêt modèle du Bas-St-Laurent inc. 67 p.

- O'Dell T.E., J.F. Ammirati et E.G. Schreiner, 1999. Species richness and abundance of ectomycorrhizal basidiomycete sporocarps on a moisture gradient in the *Tsuga heterophylla* zone. *Canadian Journal of Botany* 77: 1699–1711.
- Peredo H., Oliva, M., et A. Huber, 1983. Environmental factors determining the distribution of *Suillus luteus* fructifications in *Pinus radiata* grazing-forest plantations. *Plant and Soil* 71: 367–370.
- Perrin R., 1985. L'aptitude des mycorhizes à protéger les plantes contre les maladies : panacée ou chimère? *Annales des Sciences Forestières* 42 : 453-470.
- Pilz, D., R. Molina et J. Mayo, 2006. Effects of thinning young forests on chanterelle mushroom production. *Journal of Forestry* 104(1): 9-14.
- Pilz D. et R. Molina, 2001. Commercial harvests of edible mushrooms from the forests of the Pacific Northwest United States: issues, management, and monitoring for sustainability. *Forest Ecology and Management* 155: 3-16.
- Pinna S., M.-F. Gévry, M. Côté et L. Sirois, 2010. Factors influencing fructification phenology of edible mushrooms in a boreal mixed forest of Eastern Canada. *Forest Ecology and management* 260: 294-301.
- Pominville P., S. Déry et L. Bélanger, 1999. Dynamique de la sapinière à bouleau jaune de l'est après une épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette. *Forestry Chronicle* 75(3): 515-534.
- Pritsch K. Et J. Garbaye, 2011. Enzyme secretion by ECM fungi and exploitation of mineral nutrients from soil organic matter. *Annals of Forest Science* 68: 25-32.
- R Development Core Team, 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Ricklefs R.E. et G.L. Miller, 2005. *Ecology*, fourth edition. De Boeck. New York, p.429-431.
- Salerni, E. et C. Perini, 2004. Experimental study for increasing productivity of *Boletus edulis* s.l. in Italy. *Forest Ecology and Management* 201: 161-170.
- Shaw P.J.A, G.Kibby et J. Mayes, 2003. Effects of thinning treatment on an ectomycorrhizal succession under Scots pine. *Mycological research* 107 (3): 317–328.
- Simard S.W., D.A. Perry, M.D. Jones, D.D. Myrold, D.M. Durall et R. Molina, 1997. Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field. *Nature* 388: 579-582.

- Stenström E., E. Damm et T. Unestam, 1997. Le rôle des mycorhizes dans la protection des arbres forestiers contre les agents pathogènes du sol. *Revue Forestière Française* 49: 121-128.
- Stevens V. 1997., The ecological role of coarse woody debris: an overview of the ecological importance of CWD in B.C. forests. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C. Work.Pap. 30 p.
- Straatsma G., F. Ayer et S. Egli, 2001. Species richness, abundance, and phenology of fungal fruit bodies over 21 years in a Swiss forest plot. *Mycological Research* 105 (5): 515-523.
- Strand R.F., 1968. The effect of thinning on soil temperature, soil moisture, and root distribution of Douglas-fir. Dans: *Tree Growth and Forest Soils. Proceedings of the Third North American Forest Soils Conference.* Edité par C.T. Youngberg et C.B. Davey. Oregon State University Press, Corvallis. p. 295–304.
- Suzuki N. et J.P Hayes, 2003. Effects of Thinning on Small Mammals in Oregon Coastal Forests. *The Journal of Wildlife Management* 67(2): 352-371.
- Tarroux E., A. DesRochers et C. Krause, 2010. Effect of natural root grafting on growth response of jack pine (*Pinus banksiana*) after commercial thinning. *Forest Ecology and Management* 260 : 526–535.
- Villeneuve N., 2000. Diversité et productivité des champignons forestiers : les apports de la recherche et de l'inventaire. Dans : *Les champignons forestiers : récolte, commercialisation et conservation de la ressource.* Edité par J.A. Fortin et Y. Piché. Centre de recherche en biologie forestière, Université Laval, Québec. p. 91–100.
- Wu B., K. Nara et T. Hogetsu, 1999. Competition between ectomycorrhizal fungi colonizing *Pinus densiflora*. *Mycorrhiza* 9 :151–159.
- Zahner R. et F.W Withmore, 1960. Early growth of radically thinned loblolly pine. *Journal of Forestry* 58: 628-634.

