

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

OPTIMISATION DU VOLUME RÉCOLTABLE DE BOIS PAR
L'INTÉGRATION DES COUPES PARTIELLES : EFFET DU NOMBRE DE
GROUPES STRATES

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN ÉCOLOGIE

PAR

LIONEL NGUEMA ENDAMNE

AVRIL 2019



BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

REMERCIEMENTS

Je remercie d'abord le Programme Canadien des Bourses de Francophonie (PCBF) pour le financement accordé qui m'a permis de suivre ce programme de maîtrise de recherche en écologie, mon directeur Osvaldo Valeria et mon co-encadreur Louis Dumas pour leur disponibilité, leurs conseils, leur enthousiasme et leur générosité. Malgré toutes les difficultés rencontrées, ils m'ont accompagné jusqu'au bout du projet. Je remercie également Sandra Veillette, Lise Guay, Louis Prévost et Narayan Dhital de m'avoir aidé à comprendre les différents modèles d'optimisation des possibilités forestières utilisés lors de mon étude. Merci à Mohammed Henneb de m'avoir aidé à réaliser mes analyses statistiques et pour sa sincère amitié.

Merci à Geneviève Labrecque pour leur collaboration en entreprise, soit Ryam. Je remercie également David Baril et Louis Prévost du bureau forestier en chef pour sa collaboration avec le calcul de la possibilité forestière de l'Abitibi-Témiscamingue. Par ailleurs, je tiens à mentionner que j'ai apprécié nos différents échanges lorsque je vous ai présenté mes résultats préliminaires.

Heureux d'avoir eu l'appui de ma famille tout au long de mes études. Merci au couple Mebiame mon père et ma mère, à mes frères et sœurs. Merci à madame Nguema et à messieurs Mba et Nguema mes deux fils pour leurs soutiens affectifs. Je remercie tous mes collègues du Gabon qui ont contribué de prêt ou de loin à ma réussite, particulière Freddy Nguema Allogo, Alyas Libeshy Moudenda et Reymond Pendi qui ont été d'un soutien considérable. J'ai également apprécié tous les professeurs et professionnels de l'institut de la recherche sur la forêt de l'UQAT et merci pour ces beaux moments passés ensemble. Merci à Jeffrey, Claudel et à tous ceux que j'ai oubliés.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES SIGLES	vi
RÉSUMÉ GÉNÉRAL.....	vii
CHAPITRE I INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 Problématique	1
1.2 État des connaissances.....	2
1.2.1 Historique de la gestion forestière au Québec.....	2
1.2.2 Aménagement forestier écosystémique.....	3
1.2.3 Calcul de la Possibilité forestière (PF).....	5
1.2.4 Strates d'aménagement et courbes d'évolution du peuplement.....	9
1.3 Objectif du projet d'étude	12
CHAPITRE II OPTIMISATION DU VOLUME RÉCOLTABLE DE BOIS PAR L'INTÉGRATION DES COUPES PARTIELLES : EFFET DU NOMBRE DE GROUPESTRATES.....	13
2.1 Résumé.....	14
2.2 Introduction	15
2.3 Méthodologie	17
2.3.1 Zone d'étude.....	17
2.3.2 Modèles d'optimisation de la possibilité forestière.....	19
2.3.3 Analyse statistique	23
2.4 Résultats.....	25
2.4.1 Effet du regroupement des strates sur les caractéristiques de la forêt..	25
2.4.2 Effet du regroupement des strates combiné à des proportions variables des coupes partielles sur le volume récoltable.....	28
2.5 Discussion	34
2.6 Conclusion.....	37
CHAPITRE III CONCLUSION GÉNÉRALE.....	38
ANNEXE A Schématisation du modèle d'optimisation Dhital.....	40
ANNEXE B Schématisation du modèle d'optimisation BFEC.....	41
ANNEXE C Schématisation du modèle d'optimisation Ryam.....	42
BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE.....	43

LISTE DES FIGURES

Figure	Pages
1.1	Simulation de l'estimation du volume récoltable par groupe de strate à l'aide des courbes d'évolution de rendement (Kangas et Kangas, 1999)..... 8
1.2	Exemple d'une courbe actuelle d'évolution d'un groupe de strates (en brun) issue du modèle de régression sur les courbes de croissance des placettes de deux strates d'aménagement tiré de (Poulin, 2013) 10
2.1	Localisation de l'aire d'étude, unité d'aménagement 85-51 (Tembec, 2012). 18
2.2	Superficies moyennes occupées par les différentes classes d'âge des peuplements par modèle 26
2.3	Superficies totales (erreur type) de toutes les strates ayant comme types écologiques ME1 par modèle..... 27
2.4	Courbe d'évolution moyenne du volume (m^3/ha) des peuplements de l'ensemble des strates de l'UA par modèle en fonction de l'âge. 27
2.5	Évolution du volume (m^3) sur pied du groupe de SEPM par modèle pour 30 périodes de 5 ans de planification..... 28
2.6	Volume récoltable moyen (Vrec) du groupe SEPM et superficie moyenne récoltée en CP (%Sup_CP) par modèle, en fonction des proportions des coupes partielles. 30
2.7	Valeur relative moyenne du volume récolté SEPM (MPVRec)réalisé par modèle, en fonction de la valeur relative moyenne des pourcentages de superficies réalisés en CP..... 32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Répartition de la superficie (ha) du territoire aux fins du calcul de la PF (Gouvernement du Québec, 2014).....	19
2.2 Paramètres de modélisation et critères d'admissibilité (type écologique, âge, DME, volume et surface terrière) des coupes partielles par modèle OPF.	22
2.3 Modèle candidat pour la prédiction du volume récoltable du groupe d'essence des SEPM. Analyse par AIC (critère d'information d'Akaike)...	24
2.4 Superficies totales (ha) des strates du groupe SEPM par modèles OPF, UA 85-51.	25
2.5 Sélection des modèles candidats de la régression linéaire multiple prédisant le volume récoltable en fonction des modèles d'OPF, des proportions de coupe partielle exigées et des périodes de planification. Le modèle en gras est le modèle sélectionné.....	33
2.6 Résultat de la régression linéaire du mod2 ($\alpha \leq 0.05$)	33

LISTE DES SIGLES

AFÉ	Aménagement forestier écosystémique
BD	Base de données
BFEC	Bureau forestier en chef
COS	Compartiment d'organisation spatiale
CP	Coupe partielle
CPF	Calcul de la possibilité forestière
CPRS	Coupe avec protection de la régénération et des sols
DIF	Direction des inventaires forestiers
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
OPF	Optimisation de la possibilité forestière
STM	Surface terrière marchande
TBE	Tordeuse des bourgeons de l'épinette
UA	Unité d'aménagement
VM	Volume marchand
VRec	Volume récoltable
SIG	Système d'information géographique
SCIF	Système de compilation de l'inventaire forestier

RÉSUMÉ GÉNÉRAL

Le mode de gestion de la forêt a évolué au Québec, il est actuellement basé sur l'aménagement forestier écosystémique (Gouvernement, 2012). Ce nouveau mode de gestion fait partie intégrante de la réglementation visant la réalisation d'une gestion durable et responsable des forêts au Québec. La mise en œuvre de l'aménagement écosystémique au Québec est en quelque sorte assujettie à la détermination de la possibilité forestière, c'est-à-dire le stock de bois disponible pour un territoire donné et sur un horizon de 150 ans. Ce calcul de la possibilité forestière s'appuie sur des modèles de croissance issus des données d'inventaires forestiers et sur un regroupement de strates forestières (regroupement des peuplements ayant des caractéristiques similaires) auxquelles des traitements sylvicoles sont appliqués. Le regroupement de strates est basé sur l'opinion d'experts et lié à des hypothèses de succession des peuplements représentés dans une courbe de croissance aux fins de modélisation. Les choix du regroupement des strates par le modélisateur risquent d'avoir des effets importants sur la possibilité forestière (ex. modèle Woodstock) lorsqu'on veut augmenter la superficie traitée en coupe partielle. Cette étude avait pour objectif de comprendre l'effet du nombre de strates regroupées et d'une plus grande utilisation des coupes partielles (CP) sur le volume récoltable, dans des modèles d'optimisation de la possibilité forestière. Pour cela, nous avons comparé le volume récoltable (m^3) du groupe d'essence SEPM issu de trois modèles de calcul de la possibilité forestière pour l'unité d'aménagement 085-51 situé au nord-ouest de l'Abitibi. Les trois modèles ont des nombres fixes, de groupes de strates, respectifs de 107 (Modèle Dhital), 173 (Modèle BFEC) et 1631 (Modèle Tembec). Pour chaque modèle, des scénarios correspondant à différentes proportions du traitement sylvicole en CP (5%, 15%, 25%, 40%, 60% et 70%) ont été comparés à la solution optimale où les contraintes ont été relâchées. Ces scénarios ont été par la suite optimisés à l'aide du logiciel Woodstock Remsoft® afin d'estimer le volume récoltable sur une période de planification de 150 ans. La sélection des modèles à l'aide du critère d'AIC a permis d'expliquer la réponse en volume selon : les modèles, périodes et proportions de CP.

L'étude montre que le nombre de regroupements des strates et les proportions de CP ont un effet significatif sur le volume récoltable. Cette étude évalue le niveau d'influence de ces paramètres (strates forestières et CP) sur la possibilité forestière toute en identifiant la flexibilité des modèles à intégrer les coupes partielles et dévoile l'importance de la stratification forestière lors de la mise en œuvre d'un aménagement forestier durable pour un territoire donné.

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Problématique

La mise en application de l'aménagement forestier écosystémique (AFÉ) au Québec en 2013 a eu pour effet de consacrer davantage d'attention à l'usage des outils sylvicoles à forte rétention comme les coupes partielles (CP) (Gauthier et al., 2008; Gouvernement, 2012) pour atteindre ses différents les objectifs d'une gestion écosystémique. Les coupes partielles en peuplement résineux permettent de réduire l'envahissement des feuillus de début de succession et d'émuler les perturbations naturelles secondaires (Danneyrolles, 2016; Gauthier et al., 2008; Ruel et al., 2007). Elles maintiennent la structure initiale des peuplements forestiers et ont un faible impact sur la faune dans les forêts aménagées (Cimon-Morin et al., 2010; Le Blanc et al., 2010). Mais, les coûts d'approvisionnement élevé, lié à la mise en œuvre des CP sur le terrain, compromettent leurs utilisations.

En outre, l'un des principaux défis l'aménagement forestier écosystémique est le maintien des forêts productives et créatrices des richesses diversifiées (Gouvernement du Québec, 2015). Cela passe par le maintien d'une capacité productive constante de volume de bois. La possibilité forestière est le niveau de récolte qui permet de conserver cette capacité productive (Coulombe, 2004). Au Québec, la possibilité forestière est déterminée à l'aide des modèles d'optimisation et permet d'estimer le volume de bois récoltable annuellement par essence et par groupe d'essence, tout en respectant des contraintes territoriales et les difficultés des opérations de récolte (Raulier et al., 2014). Cependant, ces modèles d'optimisation peuvent être paramétrés de diverses manières, dépendamment de l'expérience de l'aménagiste, et pourraient affecter significativement la réponse du modèle d'optimisation. En effet, ces modèles d'optimisation sont réalisés sur la

base des courbes de croissance et de rendement, issues des données d'inventaire forestier et des peuplements regroupés en strates forestières d'aménagement. Ces courbes de croissance sont estimées pour différentes strates en utilisant les différentes caractéristiques de celle-ci (ex. espèce d'arbre, diamètre moyen, le nombre de tiges à l'hectare, la hauteur dominante) (Pothier et Savard, 1998). Ainsi, l'aménagiste définit ces différents critères de choix de regroupement des strates forestières et diminue ou augmente le nombre de strates à intégrer dans un modèle d'optimisation en fonction des données disponibles. Il est donc important de se questionner sur l'influence du choix de regroupement des strates sur la réponse du calcul de la possibilité forestière (volume récoltable) lorsqu'on veut évaluer l'effet de l'utilisation d'une proportion plus importante des coupes partielles sur un territoire?

1.2 État des connaissances

1.2.1 Historique de la gestion forestière au Québec

Avec 347,1 millions d'hectares (ha) des forêts, 201 645 emplois directs dans l'industrie forestière et des bénéfices d'exploitation de 2645 millions de dollars canadiens en 2015, la forêt occupe une place importante dans le paysage économique, social et environnemental canadien (Gouvernement du Canada, 2016). C'est au début du XIX^e siècle que se développe la première exploitation commerciale du bois d'œuvre (Drushka, 2003a) dans le but de répondre à la forte demande anglaise en bois pour la construction des navires. L'absence d'une réglementation en matière d'exploitation forestière entraîne la raréfaction du pin blanc (*Pinus Strobus L.*) et la réduction des diamètres des arbres disponibles dans le sud-est du Canada (Drushka, 2003b; Hébert, 2006). Pour préserver la matière ligneuse et assurer la stabilité de l'industrie du bois, le Canada adopte en 1849 la Loi sur l'administration des bois et des forêts de la Couronne qui incite les industriels à planifier leur récolte sur les espaces forestiers concédés (Gauthier et al., 2008).

L'augmentation de la demande américaine en papier journal entraîne une production de pâte à papier dépassant celle du bois d'œuvre et la baisse du capital ligneux au début du XX^e siècle (Bouthillier, 1998; Gaudreau, 1999). L'extension et l'intensification de l'exploitation forestière des épinettes (*Picea sp*), sans égard au diamètre minimum exploitable dans l'industrie du papier (Gauthier et al., 2008) amène les gestionnaires des forêts à adhérer au concept du rendement soutenu, qui entraîne le développement des pratiques sylvicoles et le calcul du volume de bois récoltable afin d'assurer la production soutenue de bois (Drushka, 2003a). Au Québec, c'est en 1986 que la notion du rendement soutenu sera inscrite dans la loi sur les forêts (Bouthillier, 1998).

Par ailleurs, l'extension de l'exploitation forestière et l'usage, dans la forêt boréale, de stratégies sylvicoles favorisant les coupes à faible rétention comme les coupes totales, posaient de sérieuses interrogations quant à la résilience des écosystèmes forestiers (Gauthier et al., 2008).

À cet effet, le Gouvernement du Québec met en application l'aménagement forestier écosystémique (AFÉ) en 2013, qui vise à émuler les perturbations naturelles et à réduire l'écart entre forêt naturelle et aménagée, tout en assurant la récolte de la matière ligneuse et la conservation de la biodiversité (Gauthier et al., 2008; Kimmins, 2004; RLRQ Chapitre A-18).

1.2.2 Aménagement forestier écosystémique

L'AFÉ est un mode de gestion qui a apporté des changements dans la pratique en matière d'aménagement et d'exploitation (Gouvernement, 2012). Comme principal changement, en matière de traitement sylvicole, l'aménagement écosystémique déconseille l'usage quasi unique des coupes totales (Danneyrolles, 2016), des coupes avec protection de la régénération et des sols (CPRS) et des coupes en mosaïque (CMO) (Raulier et al., 2009), car celles-ci tendent à réduire la diversité forestière, éliminent les vieilles forêts et ne permettent pas de garantir le maintien de la variabilité naturelle de la forêt. Par conséquent elles affectent la biodiversité

en réduisant la proportion des vieilles forêts (Bergeron et Le Goff, 2005; Bergeron et al., 2002). Par ailleurs, plusieurs études ont démontré que l'usage de la coupe partielle dans les peuplements mixtes permettrait de reproduire les effets de la mortalité naturelle résultant des perturbations naturelles secondaires en conservant les attributs clés de la composition et de la structure des peuplements (Gendreau-Berthiaume et al., 2012). Elle est fortement suggérée dans l'aménagement écosystémique (RLRQ Chapitre A-18) pour sa capacité à : (1) maintenir les attributs d'habitat favorables pour une variété d'organismes (Fenton et al., 2013; Ruel et al., 2013), (2) augmenter la croissance des arbres résiduels dans divers types de forêts boréales (Thorpe et al., 2007) et (3) conserver la composition des peuplements mixtes tout en favorisant la régénération avancée des résineux dans l'est de la forêt boréale (Prévost et Pothier, 2003). Ainsi, la coupe partielle est donc un outil qui a pour avantage d'assurer le maintien des fonctions écologiques dans les forêts mixtes et les caractéristiques des différentes cohortes (ex. connectivités, tailles, formes) (Brais et al., 2013; Latrémouille, 2008).

Malgré son potentiel à répondre aux objectifs écologiques de la gestion écosystémique, les coupes partielles ont pour inconvénient d'entraîner la hausse des coûts d'approvisionnement. Pour un prélèvement de 70 m³/ha observé, les frais directs supplémentaires de récolte seraient de 130 \$/ha et 290 \$/ha pour le jardinage avec sentiers temporaires et le jardinage avec sentiers permanents respectivement (Ruel et al., 2007), 400\$/ha pour une éclaircie commerciale (Meek, 2000) et 80 \$/ha pour la coupe de protection des petites tiges marchandes (CPPTM) (Ruel et al., 2007). L'utilisation de la CP est donc plus dispendieuse comparativement à la CPRS (Pasturel, 2013; Volpé, 2007). Ainsi, son coût élevé d'approvisionnement en bois est une contrainte qui peut freiner son usage lors de la mise en œuvre d'une gestion écosystémique. Cependant, Moore et al. (2011) montrent à l'aide de la simulation de Monté Carlo (200 ans sur 1000 ha) que la rentabilité financière de la CP pourrait être plus avantageuse à long terme que la CPRS.

1.2.3 Calcul de la Possibilité forestière (PF)

Le calcul de la possibilité forestière permet d'estimer le stock de bois disponible et récoltable par période de 5 ans de manière constante sur une période de planification de 150 ans. Il se fait en interaction avec l'élaboration de la stratégie d'aménagement et permet d'identifier les moyens les plus efficaces pour répondre aux objectifs de production soutenue de bois d'œuvre, de conservation de la biodiversité et des fonctions écologiques de la forêt (Gouvernement, 2013b). Il consiste essentiellement à prévoir, à long terme et à grande échelle, l'approvisionnement périodique en bois dans le but d'optimiser la récolte en volume (Dhital et al., 2013). Il dépend beaucoup des paramètres utilisés (Volpé, 2007 ; Dhital et al. 2013 ; Pasturel, 2013), par exemple les strates forestières regroupant les peuplements ayant une composition et des caractéristiques semblables (essences forestières dominantes, densité de peuplement, classe d'âge et origine de peuplement), les données d'inventaire forestier, la structure forestière et les courbes de croissance des volumes marchands pour chaque strate.

Au Québec, le calcul des possibilités forestières est réalisé par le bureau du forestier en chef (BFEC) sur la base des modèles d'optimisation, en utilisant des logiciels comme Woodstock (Remsoft, 2006). Le logiciel spatial Woodstock Remsoft® est un outil de planification forestière permettant d'utiliser des stratégies de gestion faisant évoluer la dynamique forestière et constitue également un outil d'aide à la décision pour les aménagistes forestiers (Rauscher, 1999). Woodstock utilise trois méthodes qui sont (1) la méthode déterministe, dans laquelle l'utilisateur fixe la stratégie et le système calcule le résultat obtenu ; (2) la méthode probabiliste, qui permet au système de calculer la probabilité d'obtenir un résultat et (3) la programmation linéaire qui consiste à résoudre des équations mathématiques, en considérant des contraintes. Woodstock permet de trouver le meilleur scénario pour optimiser un objectif en respectant lesdites contraintes (c'est la méthode la plus utilisée) (Remsoft, 2006). Ce logiciel est constitué de deux applications supplémentaires, soit Stanley, qui spatiale la solution du calcul de possibilité forestière produit par

Woodstock, et Mosek, qui permet de résoudre la matrice produite par Woodstock de manière optimale (Remsoft, 2006).

Il est possible d'utiliser Woodstock pour estimer les coûts et les revenus d'un aménagement forestier (Pasturel, 2013; Remsoft, 2006). Par ailleurs, la considération des contraintes spatiales dans Woodstock peut occasionner une hausse ou une baisse de la possibilité ligneuse de + ou -20 % contrairement à la solution Sylva (Coulombe, 2004).

La figure 1.1 présente les différentes étapes menant à l'estimation du volume récoltable par groupe de strates à l'aide des courbes d'évolution des peuplements. Cette figure montre que lors de l'optimisation de la possibilité forestière, le logiciel Woodstock procède au calcul du volume maximal exploitable en s'appuyant sur les caractéristiques (diamètres moyens et hauteur ...) des différentes courbes d'évolutions des strates regroupées. Le volume récoltable est calculé après application des différents traitements sylvicoles (CPRS, CP...) qui sont les principales contraintes considérées dans notre étude. Après suppression des proportions de chaque classe de diamètre des essences récoltées, le calcul des caractéristiques du peuplement après coupe se fait à l'aide des courbes d'effet de traitements faisant évoluer les strates traitées dépendamment du type de forêt et du traitement sylvicole (Gouvernement, 2013b; Poulin, 2013). Et le cycle continu jusqu'à la 30^e période quinquennale de planification.

Les courbes d'évolution des peuplements, utilisées dans le calcul de la possibilité forestière, sont réalisées sur la base des modèles de croissance en diamètre et en hauteur des arbres individuels (Hynynen, 1995). Les diamètres, hauteurs et le nombre de tiges ne sont connus qu'au début de la simulation à travers les courbes de croissances réalisées pour les groupes de strates considérés (Kangas, 1997). Ensuite, le diamètre et la hauteur sont prédits avec des modèles de croissance en tant que fonction des caractéristiques des peuplements et des arbres. Le nombre maximum de tiges dans une période est prédit en fonction du diamètre moyen d'un peuplement (Kangas, 1997). En plus des modèles de croissance en hauteur et

diamètre, des modèles pour le volume (Laasasenaho, 1982), la croissance des arbres dominants (Vuokila et Valiaho, 1980) et la mortalité naturelle (Hynynen, 1993) sont également utilisés lors du calcul de la possibilité forestière.

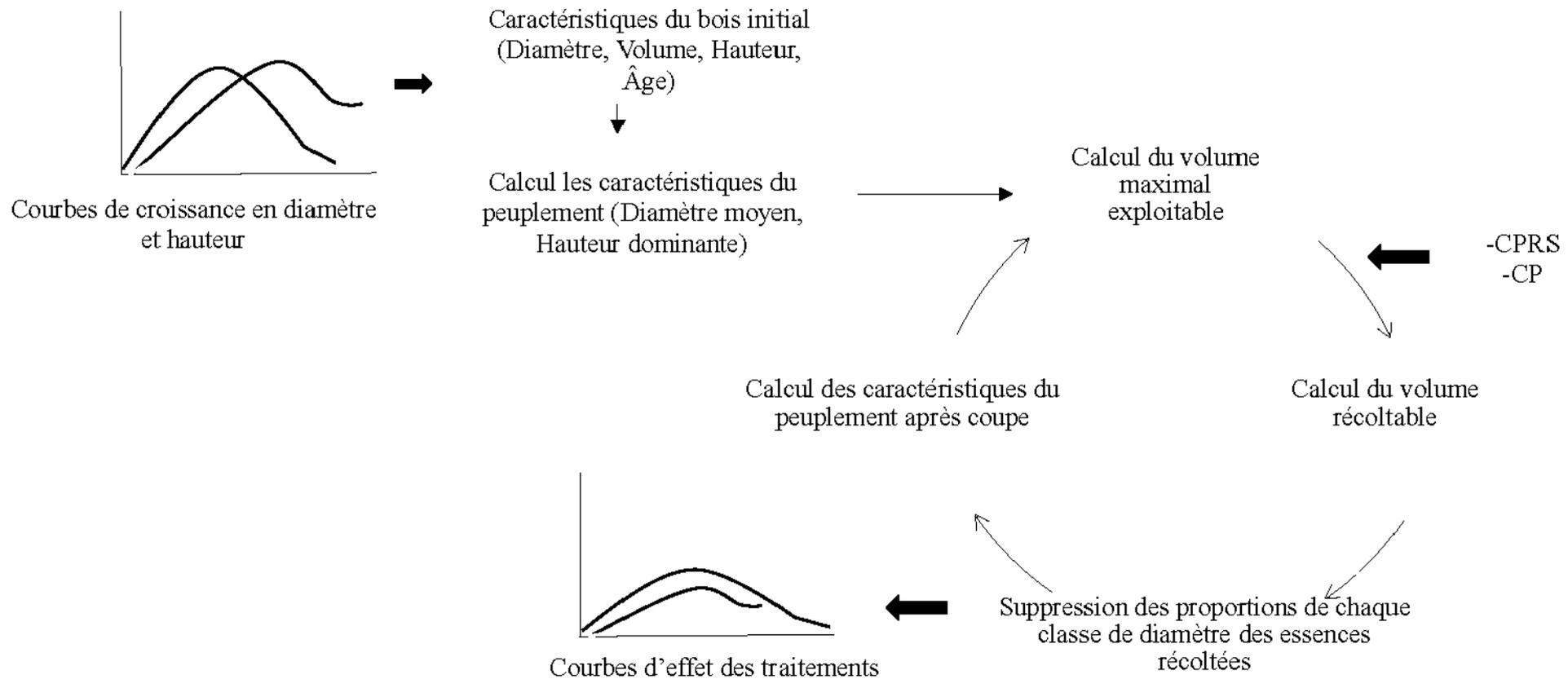


Figure 1.1 Simulation de l'estimation du volume récoltable par groupe de strate à l'aide des courbes d'évolution de rendement (Kangas et Kangas, 1999)

1.2.4 Strates d'aménagement et courbes d'évolution du peuplement

Les strates cartographiques sont des polygones écoforestiers possédant la même appellation cartographique décrivant les caractéristiques du peuplement (composition, hauteur, densité du couvert), les conditions biophysiques (dépôt de surface, drainage), la dynamique forestière (végétation potentielle) et l'histoire des perturbations naturelles et anthropiques (Gouvernement du Québec, 2013). Les strates d'aménagement sont constituées des regroupements de strates cartographiques ayant des caractéristiques (type de couvert, groupe d'essence, perturbation, classe des hauteurs, classe d'âge) similaires, auxquelles on peut appliquer les mêmes traitements sylvicoles (Poulin, 2013). Ces strates d'aménagement contiennent des données dendrométriques moyennes (ex. : surface terrière, nombre de tiges, volume), collectées dans les différentes placettes d'inventaire contenues dans les strates cartographiques, qui servent de base à la stratégie sylvicole et à la création des courbes de croissance (Gouvernement du Québec, 2013b).

L'élaboration des strates d'aménagement est basée sur la similitude des attributs des strates cartographiques selon des critères (groupe d'essence dominant, type écologique, moyenne classe d'âge, de diamètre, de hauteur et de densité) de regroupement définis dans le manuel de détermination des possibilités forestières (Poulin, 2013). Ensuite, ces critères cités plus haut imposent les valeurs des attributs d'appellation cartographie et les éventuels regroupements pour chaque attribut. Enfin, les strates d'aménagement sont créées de façon discrétionnaire en appliquant des compromis, comme conserver autant que possible l'homogénéité (structure, composition, type écologique) des strates, tout en demeurant cohérent avec les objectifs d'aménagement forestier (Gouvernement du Québec, 2013b). Les principes de regroupement sont adaptés aux caractéristiques des peuplements de chaque unité d'aménagement. Le système de compilation de l'inventaire forestier (SCIF), conçu par la direction de l'inventaire forestier (DIF), est l'outil utilisé pour le regroupement des strates (Gouvernement du Québec, 2013b). Les strates d'aménagement sont classées en groupes des strates. Ce regroupement est effectué

à l'aide d'un filtre, ou clé dichotomique sur la base du diagnostic sylvicole. Ils doivent être constitués des strates d'aménagement représentant différents stades de développement des peuplements avec des caractéristiques relativement homogènes sur la dynamique végétale et la structure (régulière, irrégulière ou jardinée) (Poulin, 2013). Le regroupement des strates d'aménagement à des fins de calcul de la possibilité forestière n'obéit à aucune règle concernant le nombre de strates à regrouper. Cependant, on comprend bien que les caractéristiques des strates regroupées correspondent à une moyenne des strates d'aménagement.

Pour chaque groupe de strate d'aménagement, l'évolution de la croissance des peuplements forestiers est représentée par une courbe d'évolution lors du calcul de la possibilité forestière (Poulin, 2013). Elle est une moyenne des courbes de croissance produites pour chaque placette d'inventaire (voir figure 1.2). Ces courbes sont souvent calculées en utilisant le modèle empirique de croissance et de rendement (Dhital et al., 2013; Pothier et Savard, 1998).

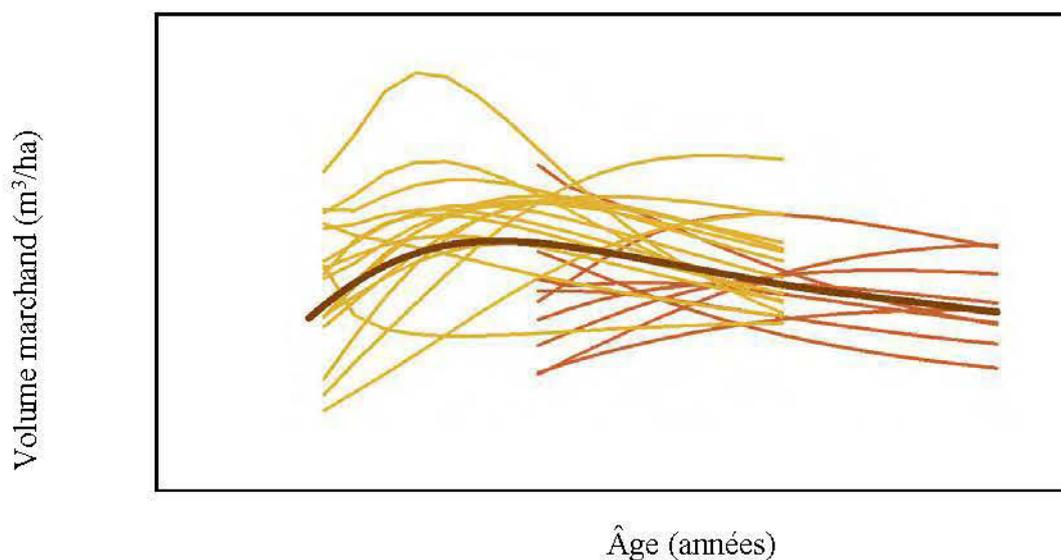


Figure 1.2 Exemple d'une courbe actuelle d'évolution d'un groupe de strates d'aménagement (en brun) issues du modèle de régression sur les courbes de croissance des placettes de deux strates d'aménagement tiré de Poulin, 2013.

Les modèles utilisés le plus souvent sont le modèle de croissance et de rendement calibré à l'échelle du peuplement (tables de production) pour projeter l'évolution du volume marchand des groupes de strates d'aménagement. Mais ces modèles ont pour source d'erreur la densité du peuplement dans les différentes strates (Dhital et al., 2013) et l'insuffisance des placettes d'inventaire forestier (Coulombe et al., 2004). Au Québec, les courbes de croissance sont issues des modèles de croissance ARTEMIS-2009 ou NATURA-2009 (Gouvernement, 2013a; Poulin, 2013). NATURA-2009 est un modèle de croissance à l'échelle du peuplement et élaboré à l'échelle du sous-domaine bioclimatique par groupe d'essences (ex. feuillus intolérants, feuillus tolérants, résineux intolérants, résineux tolérants et sapin baumier) (Pothier, 2011 ; Gouvernement, 2013a). Il prédit l'évolution de la surface terrière marchande, le nombre de tiges marchandes et le volume marchand en fonction de l'âge du peuplement qui est déterminé par le diamètre, la hauteur et la moyenne de l'âge des arbres échantillons dominants et codominants, toutes essences confondues (David et Isabelle, 2011; Gouvernement, 2013b). ARTEMIS-2009 est un modèle de croissance par tiges individuelles prédisant la probabilité de mortalité des tiges, l'accroissement des diamètres à hauteur de poitrine (DHP) des tiges vivantes, sélectionne le nombre et le DHP des recrûs en tiges marchands (Le Blanc et al., 2010). Ces différentes courbes d'évolution sont réalisées sur la base des informations (ex. volumes, surfaces terrières, essences dominantes) des strates d'aménagement semblables regroupées en groupe de strates. Sachant que la composition du regroupement des strates est réalisée dépendamment de l'aménagiste, le nombre de strates peut donc avoir une influence sur la réponse du modèle de croissance selon le regroupement effectué (Dhital et al., 2013).

1.3 Objectif du projet d'étude

Lors de la détermination de la possibilité forestière, le modélisateur s'appuie sur des modèles de croissances issues des données dendrométriques de l'inventaire forestier contenues dans les groupes de strates forestières (constitués des strates d'aménagement) préalablement définies par l'aménagiste responsable du calcul. Les données dendrométriques des strates d'aménagement sont la moyenne de celle des strates cartographiques. Nous pensons que l'utilisation d'un nombre plus élevé de groupes de strates (strates moins regroupées entraîne moins de moyennes des données dendrométriques) dans le modèle d'optimisation, lorsqu'on veut augmenter la proportion de coupe partielle, génère plus d'opportunité dans la réponse du volume à récolter. Ainsi, nous aurons une augmentation significative de la possibilité forestière.

Cette étude avait pour objectif principal de comprendre l'importance du nombre de strates regroupées dans des modèles d'optimisation et mesurer l'effet d'une plus grande utilisation des coupes partielles sur la possibilité forestière dans un peuplement mixte du domaine de la pessière noire à mousse de l'ouest.

CHAPITRE II

OPTIMISATION DU VOLUME RÉCOLTABLE DE BOIS PAR L'INTÉGRATION DES COUPES PARTIELLES : EFFET DU NOMBRE DE GROUPESTRATES

Lionel NGUEMA ENDAMNE¹, Osvaldo VALERIA¹, Louis DUMAS².

¹ Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Institut de recherche sur la forêt, Chaire industrielle CRSNG-UQAT-UQAM en Aménagement Forestier Durable. 445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda, Qc. J9X 5E4

² RYAM Gestion forestière, 225, 9^e avenue Est, C.P.2500, La Sarre, Québec, Canada J9X 2X6

2.1 Résumé

Au Québec, le calcul de la possibilité forestière réalisé à l'aide des modèles d'optimisation utilise les regroupements de peuplements en strates forestières afin de simplifier le traitement de l'information. Cependant, les choix du regroupement des strates peuvent affecter significativement la possibilité forestière lorsqu'on veut augmenter l'utilisation des coupes partielles (CP). L'objectif de cette étude était de comprendre l'effet du nombre de regroupement des strates sur le calcul de la possibilité lorsqu'une plus grande utilisation de CP est modélisée pour un même territoire. Nous avons comparé le volume récoltable (m^3) par période de 5 ans ($n=30$) du groupe d'essence des SEPM (Sapin, Épinette, Pin et Mélèze). Trois modèles d'optimisation des possibilités forestière (OPF) avec des nombres de regroupements des strates différents ($n=107, 173, 1631$), réalisés avec le logiciel d'optimisation Woodstock pour l'unité d'aménagement 085-51 situé au nord-ouest de l'Abitibi, ont été utilisés. Pour chaque modèle, des scénarios correspondant à différentes proportions de CP (5%, 15%, 25%, 40%, 60% et 70%) ont été comparés à la solution optimale du volume récoltable où les contraintes liées à l'aménagement forestier ont été enlevées. La sélection des modèles à l'aide du critère d'AIC a permis d'expliquer la réponse en volume récoltable selon : les modèles, les périodes de planification et les proportions de CP. L'étude montre que le nombre de regroupements des strates et les proportions de CP ont un effet significatif sur le volume récoltable. Cette étude évalue le niveau d'influence de ces paramètres (strates forestières et CP) sur la possibilité forestière tout en identifiant la capacité des modèles à intégrer les coupes partielles et met en lumière l'importance de la stratification dans la mise en œuvre d'une gestion forestière durable d'un territoire donné.

Mots-clés : Possibilité forestière, coupe partielle, volume récoltable, Woodstock, optimisation, SEPM.

2.2 Introduction

Les coupes partielles sont présentées comme étant le traitement sylvicole par excellence pour répondre aux enjeux d'une gestion écosystémique. Elle s'ajoute à la liste de traitement sylvicole, car elle permettrait de reproduire les structures et compositions forestières semblables à celle mise en place par les perturbations secondaires (chablis, épidémie d'insecte...) tout en augmentant la rétention dans les paysages aménagés (Ruel et al. 2007 ; Gauthier et al. 2008 ; Cimon-Morin et al., 2010) et atténue l'impact sur les communautés animales vivant dans les forêts dominées par les vieux peuplements à structure irrégulière (Imbeau et Desrochers, 2002; Le Blanc et al., 2010). Les coupes partielles ont aussi la capacité de produire et de maintenir de façon efficace le recrutement du bois mort important pour la préservation des habitats de la faune aviaire et des insectes saproxyliques (Fenton et al., 2013). Cependant la proportion du territoire soumise à la CP et ses coûts d'approvisionnement élevés représentent des contraintes qui risquent de compromettre leur utilisation (Pasturel, 2013). Certaines études ont montré que la coupe partielle, pratiquée à un niveau de récolte inférieure à 35% à l'échelle du peuplement, ne favorise pas la régénération de certains peuplements (ex. mélange de Peuplier faux-tremble et de conifère) (Prévost et Pothier, 2003).

En outre, la gestion de la forêt boréale est fondée sur un aménagement durable à production soutenue de bois d'œuvre. Cette notion de rendement soutenu a comme pour objectif le maintien d'un potentiel de production de bois constant dans le temps. La possibilité forestière est le niveau de récolte qui permet de conserver cette capacité productive (Coulombe, 2004). Au Québec, les aménagistes forestiers utilisent des modèles d'optimisation pour déterminer la possibilité forestière. Le calcul de la possibilité forestière, réalisé à l'aide de ces différents modèles d'optimisation, a pour objectif de déterminer le volume de bois récoltable annuellement par essence et par groupe d'essence, tout en respectant des contraintes territoriales et les difficultés des opérations de récolte (Gouvernement, 2013b). Ces outils (modèles) aident donc les aménagistes à prendre des décisions qui se matérialisent de la planification forestière jusqu'à la réalisation de travaux sur le

terrain. Toutefois, ces modèles d'optimisation peuvent être paramétrés de diverses manières ce qui affectera de manière significative la réponse du modèle d'optimisation. En effet, ces modèles d'optimisation s'appuient sur des courbes de croissance des peuplements décrivant le rendement moyen des groupes de strates d'aménagement. Ces courbes de croissance sont calculées pour chaque groupe de strate en utilisant l'espèce, le diamètre moyen, le nombre de tiges à l'hectare, la hauteur dominante, les indices de qualité de station et de densité relatives (IQS et IDR) (Pothier et Savard, 1998). Or, les strates considérées, lors de la détermination de la possibilité forestière (utilisé pour la création des courbes de rendement), sont formées de regroupements des strates d'aménagement et présentant des données dendrométriques moyennes des strates cartographiques. Ainsi, l'aménagiste peut se permettre de diminuer ou augmenter le nombre de groupe de strates à intégrer dans un modèle d'optimisation en fonction de son expérience et des données disponibles afin d'émuler le comportement des peuplements, dans le temps, de la strate ou de la vitesse de la réponse du modèle d'optimisation. De ce fait, on se demande si le choix du regroupement des strates d'aménagement peut affecter significativement la possibilité forestière lorsqu'on veut augmenter l'utilisation des coupes partielles ?

L'objectif de la présente étude était de comprendre l'effet du nombre de strates d'aménagement sur le volume récoltable lorsqu'une plus grande utilisation de CP est modélisée. Pour atteindre notre objectif, nous avons comparé le volume récoltable (m^3) par période de 5 ans ($n=30$) du groupe d'essence des SEPM (Sapin, Épinette, Pin et Mélèze) pour 107, 173 et 1631 strates d'aménagement.

Nous pensons que l'utilisation d'un nombre plus élevé de strate d'aménagement combinée à une proportion variable de coupe partielle dans le modèle d'optimisation génère plus d'opportunité dans la réponse du volume à récolter.

2.3 Méthodologie

2.3.1 Zone d'étude

La zone d'étude est l'unité d'aménagement (UA) 085-51 dont la gestion forestière est assurée par la société Ryam, ex Tembec. L'UA 085-51, avec une superficie totale de 1 373 950 ha, est située dans les régions du Nord-du-Québec et de l'Abitibi-Témiscamingue (Gouvernement, 2014). 71% de la superficie de cette unité d'aménagement est dans le sous-domaine de la pessière à mousses de l'ouest et à 29 % dans le sous-domaine de la sapinière à bouleau blanc de l'ouest (Bergeron et al., 1998). La structure d'âge est dominée par la classe de 20-40 ans (31 %), en additionnant la classe de 0-20 an à cette dernière, on constate que 49 % des superficies sont représentées par ces deux classes. On note un déficit (par rapport aux années antérieures) dans les classes de 40-60 et de 60-80 ans (14 %) tandis que les classes de 80-100 ans, de 100-120 ans et plus sont bien représentées (38 %) (Gouvernement, 2014). Les peuplements sont principalement composés d'épinettes noires (*Picea mariana* (Mill) B.S.P), de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx). On y trouve aussi du sapin baumier (*Abies balsamea* (L.)Mill), de l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss), du bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh), du thuya de l'Est (*Thuja occidentalis* L.) et du mélèze larcin (*Larix laricina* (Du Roi) K.Koch) de manière plus ponctuelle (Gouvernement, 2014).

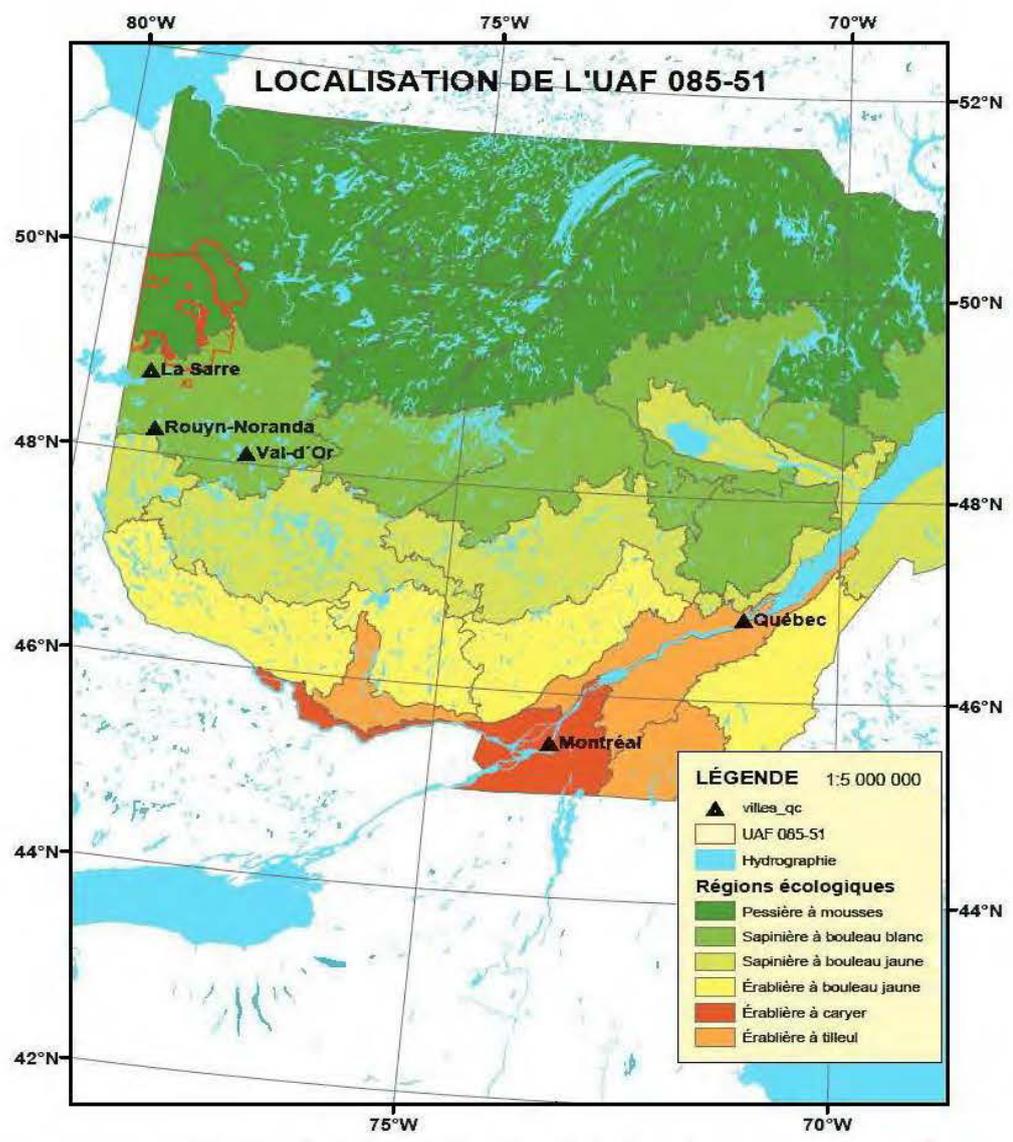


Figure 2.1 Localisation de l'aire d'étude, unité d'aménagement 85-51 (Tembec, 2012)

Tableau 2.1 Répartition de la superficie (ha) du territoire aux fins du calcul de la PF (Gouvernement du Québec, 2014).

Superficies totales	1 373 950 ha
Improductives	459 240
Superficies forestières exclues de l'UA	239 010
Incluse dans l'UA, mais exclues du calcul	77 860
Retenue dans le calcul	597 850

2.3.2 Modèles d'optimisation de la possibilité forestière

Nous avons comparé les modèles d'optimisation de la possibilité forestière (OPF) réalisés par Dhital (2013), le Bureau du forestier en chef (BFEC) et par la société Ryam, ayant un nombre (n) de strates regroupées respectif de n=107, 173 et 1631. L'élaboration des strates a été réalisée en regroupant majoritairement les groupes d'essence similaire (ex. PEPE, EE, PGPG) pour le modèle OPF Ryam. À la différence du modèle OPF du BFEC qui a constitué des strates en regroupant plusieurs groupes d'essence entre eux (ex. BBPEPG, BPFNPG) appartenant à différentes strates d'aménagement et celui de Dhital qui a élaboré des strates par compartiment spatial de coupe (COS) en rassemblant toutes les essences appartenant aux différents COS. Les COS sont des subdivisions de l'unité d'aménagement relativement homogènes quant à l'âge et à la composition des peuplements ayant une superficie supérieure à 30 km² (Kouki et Väänänen, 2000). Dans chaque modèle OPF, les différentes strates sont associées à une courbe de croissance représentant l'évolution des peuplements de la strate tout au long de la période de planification. Les courbes de croissances proviennent des modèles empiriques de croissance et de rendement de Pothier et Savard 1998, et sont disponibles pour chaque région du Québec, dont l'Abitibi-Témiscamingue. Ces modèles OPF ont été résolus à l'aide du logiciel Woodstock Remsoft® qui permet de calculer la possibilité forestière et de trouver le meilleur scénario d'augmentation

de CP pour optimiser un objectif en respectant les différentes contraintes (par programmation linéaire) (Remsoft, 2006).

Pour les modèles OPF Dhital, BFEC et Ryam, nous avons écarté toutes les contraintes, notamment celles liées à l'agglomération des coupes par les compartiments spatiaux coupes, aux budgets de réalisation des plantations forestières et de la construction des routes et créé un scénario sans contraintes, correspondant à 0% de surface récoltable en coupe partielle sollicitée. Puis nous avons fait varier les proportions de surface récoltable en coupes partielles sollicitées de 5%, 15%, 25%, 40%, 60% et 70% constituant des scénarios pour chaque modèle OPF. Les coupes partielles sont modélisées différemment dans chaque modèle OPF, selon leur type et critère d'admissibilités (tableau 2.2). Les critères d'admissibilités qui rendent un groupe de strate d'aménagement éligible aux différentes coupes partielles y sont également présentés. Les coupes partielles visent à la fois à récolter, à améliorer et à régénérer le peuplement ou la forêt en permettant à la lumière d'accéder au sol pour les essences tolérantes à l'ombre telles que le bouleau jaune (*Betula allghaniensis*), l'érable à sucre (*Acer saccharum*), le thuya occidental (*Thuja occidentalis*) (Gouvernement, 2015).

Sur une période de planification de 150 ans, nous avons optimisé, sans considérer la notion de rendement soutenue dans le calcul des possibilités forestières, et comparé le volume récoltable par période de 5 ans, du groupe d'essence des résineux SEPM, du scénario sans contrainte aux scénarios ayant des proportions variables de coupes partielles par modèle OPF. De plus, la superficie totale des strates SEPM, les structures des classes d'âge des peuplements, les superficies des strates forestières en pessière noire à peuplier faux-tremble (ME1), la courbe d'évolution du volume sur pied du groupe de SEPM (stock de bois disponible dans l'UA) et les courbes d'évolution des peuplements présentant l'état initial de la forêt issue des différents modèles OPF ont été examinées. Les différents traitements de récolte sont appliqués en pessière noire à peuplier faux-tremble (ME1). Toutes ces informations ont été extraites de la section output de Woodstock Remsoft®.

La flexibilité d'un modèle OPF à intégrer plus de coupes partielles réside dans sa capacité à générer un volume récoltable important malgré une valeur relative moyenne du volume récoltable élevé dépendamment de la proportion de coupe partielle sollicitée. Nous avons donc évalué la flexibilité des modèles OPF à intégrer plus de coupe partielle en estimant la valeur relative moyenne du volume récolté SEPM (MPVRec) réalisé par modèle OPF, en fonction des pourcentages de superficies sollicitées en CP, des scénarios 5%, 15%, 25%, 40%, 60% et 70%.

$$MPVRec = 0\%CPVRec - \%CPVRec/Np$$

MPVRec : valeur relative moyenne du volume récolté SEPM

0%CPVRec : Volume récoltable au scénario maximal 0 % CP

%CPVRec : Volume récoltable au scénario 5%, 15%, 25%, 40%, 60% ou 70%.

Np : Nombre de périodes de planification

Tableau 2.2 Paramètres de modélisation et critères d'admissibilité (type écologique, âge, DME, volume et surface terrière) des coupes partielles par modèle OPF

Modèles OPF	Types de CP ¹	Critères d'admissibilité					Surfaces terrières (ha)
		Types écologiques	Périodes =5 ans	Âges	DME (cm)	Volume (m ³ /ha)	
BFEC	Alternatif	Peuplements productifs	1	≤33		≤300	
	Éclaircies précommerciales	MS2 ² , RS2 ³ et ME1 ⁴		≥1 ≤4			
	Éclaircies commerciales	MS2, RE2 ⁵ , RS2 et ME1		-5 < AM ⁶ < -3			
	Coupe partielle	MS2, RS2 et ME1		0 < AM < 10		[100 ; 300]	
	Coupe rétention variable	Peuplements productifs		0 < AM < 30		[85 ; 300]	
	Coupe d'assainissement, jardinage, à fort prélèvement, Éclaircie jardinatoire	Peuplements productifs					[20 ; 34]
Dhital	Toutes coupes partielles confondues	Peuplements productifs			≥9	≥120	
Ryam	Éclaircies précommerciales	-anciennes plantations ;		0 < AM < 1			
		-Peuplements naturels.		1 < AM < 4			
	Éclaircies commerciales	Peuplements éduqués et non - éduqués		-5 < AM < 6		≥104	
	Coupe progressive d'ensemencement	Peuplement productif		0 < AM < 10		≥134	

¹ (MRN, 2013)

² Sapinière à Bouleau blanc

³ Sapinière à Épinette noire

⁴ Pessière noire à peuplier faux-tremble

⁵ Pessière noire à mousse ou Éricacée

⁶ Âge de maturité

2.3.3 Analyse statistique

Le but de notre analyse statistique était d'identifier les variables explicatives qui ont un effet significatif sur le volume récoltable du groupe d'essence des SEPM. Le pourcentage de superficie à réaliser en coupe partielle et les modèles OPF par leur nombre de strates ont été considérés comme variable explicative, car le volume récoltable est calculé sur la base des informations dendrométriques contenues dans les strates et est fonction de la superficie à réaliser en coupe partielle. Afin de répondre aux prémices d'application de la régression linéaire multiple, les volumes récoltables ont été transformés à l'aide de la fonction racine carrée. Nous avons procédé à la sélection des modèles en fonction du critère d'Akaike avec pour variables explicatives les modèles OPF, les périodes et les proportions de superficies récoltables en coupe partielle (Mazerolle, 2006). Les modèles candidats, présentés dans le tableau 2.3, ont été sélectionnés en partant du modèle global. Le modèle global considère toutes les variables explicatives et leurs différentes interactions. En tout, nous avons retenu 8 modèles afin de vérifier l'effet de chaque variable explicative. Nous avons aussi tenu compte des interactions entre ces variables explicatives, car elles sont toutes liées dans les modèles d'optimisation des possibilités forestières. Les analyses statistiques utilisaient un niveau de signification ≤ 0.05 et ont été réalisées avec le logiciel RStudio (RDevelopment CORE TEAM, 2008).

Tableau 2.3 Modèle candidat pour la prédiction du volume récoltable du groupe d'essence des SEPM. Analyse par AIC (critère d'information d'Akaike).

Modèles	Variabes explicatives
Mod1 ⁷ (modèle global)	Modèles OPF+ %CP ⁸ + Périodes + %CP : Modèles OPF ⁹ +Périodes : Modèles OPF + Périodes : %CP ¹⁰
Mod2	Modèles OPF+ %CP + Périodes + %CP : Modèles OPF + Périodes : Modèles OPF
Mod3	Modèles OPF+ %CP + Périodes + %CP : Modèles OPF
Mod4	Modèles OPF+ %CP + Périodes
Mod5	Modèles OPF+ %CP
Mod6	Modèles OPF
Mod7	%CP
Mod8	Périodes

⁷ Mod =Modèle

⁸ %CP= Proportion de coupe partielle

⁹ %CP : Modèles OPF= Interaction entre les modèles OPF et les proportions de coupe partielle

¹⁰ Périodes : %CP= Interaction entre les périodes et les proportions de coupe partielle

2.4 Résultats

Les résultats obtenus sont issus des données extraites du logiciel Woodstock Remsoft® avant et après l'optimisation du volume récoltable. Avant l'optimisation du volume récoltable, nous avons utilisé les données portant sur les caractéristiques (ex. structure des classes d'âges, superficie d'un type écologique) des peuplements forestiers présentés par chaque modèle OPF. Après l'optimisation du volume récoltable, les volumes sur pieds et les volumes récoltables ont été comparés parmi les trois OPF et les 7 niveaux de CP.

2.4.1 Effet du regroupement des strates sur les caractéristiques de la forêt :

La superficie totale des strates des essences résineuses (SEPM) par modèle OPF est présentée dans le tableau 2.4. Nous observons que la superficie totale des strates SEPM diffère en fonction du modèle OPF. Le modèle Ryam présente une superficie totale des strates SEPM plus élevée que celle des modèles Dhital et BFEC.

Tableau 2.4 Superficies totales (ha) des strates du groupe SEPM par modèles OPF, UA 85-51.

Modèles OPF	Nombres de strates SEPM	Superficies
Dhital	107	425219,7
BFEC	63	517801,7
Ryam	1296	522062,77

Les superficies moyennes occupées par différentes classes d'âge pour chaque modèle OPF et des données d'inventaire du 4^e décennales (Did) sont présentées dans la figure 2.2. Les données d'inventaire du 4^e décennale montre que les classes d'âge 10, 70 et 120 ans occupent une superficie de 41 955 ha, 101 455 ha et 147

134 ha. Pour le modèle BFEC, une superficie de 150 487 ha, 136 077 ha et 159 503 ha est occupée par des peuplements appartenant aux classes d'âge 10, 70 et 120 ans. Le modèle Dhital présente des superficies moyennes maximales de 172 471 ha, 172 717 ha, 184 459 ha et 234 420 ha respectivement pour les classes d'âge de 10, 70 et 120 ans. L'OPF de Ryam présente une forêt occupée majoritairement par des peuplements des classes d'âge de 10, 30 et 120 ans avec des superficies de 168 540 ha, 157 598 ha et 173 829 ha. Ces résultats nous montrent que selon le regroupement des strates dans les modèles OPF, un même territoire peut présenter des superficies différentes par classe d'âge.

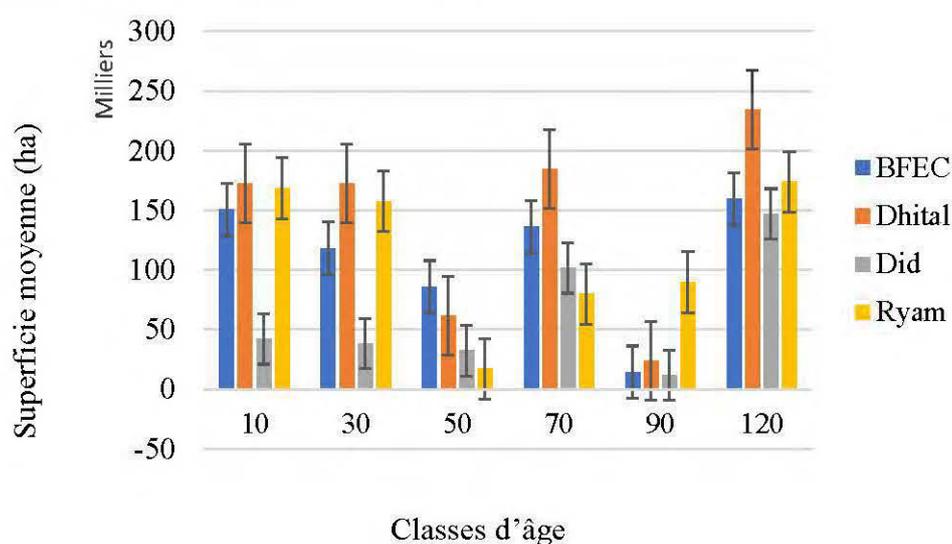


Figure 2.2 Superficies moyennes (erreur type) occupées par les différentes classes d'âge des peuplements par modèle

Les superficies en pessière noire à peuplier faux-tremble (ME1), par modèle OPF sont présentées dans la figure 2.3. Les modèles BFEC, Dhital, Ryam et des données d'inventaire du 4^e Décennales (Did) présentent respectivement des superficies totales successives de moins de 248 066 ha, de 319 749 ha, 191 208 ha et 53 424 ha. La barre d'erreur type de la superficie obtenue avec les données d'inventaire du 4^e décennales (Did) qui a un minimum d'erreur type négatif.

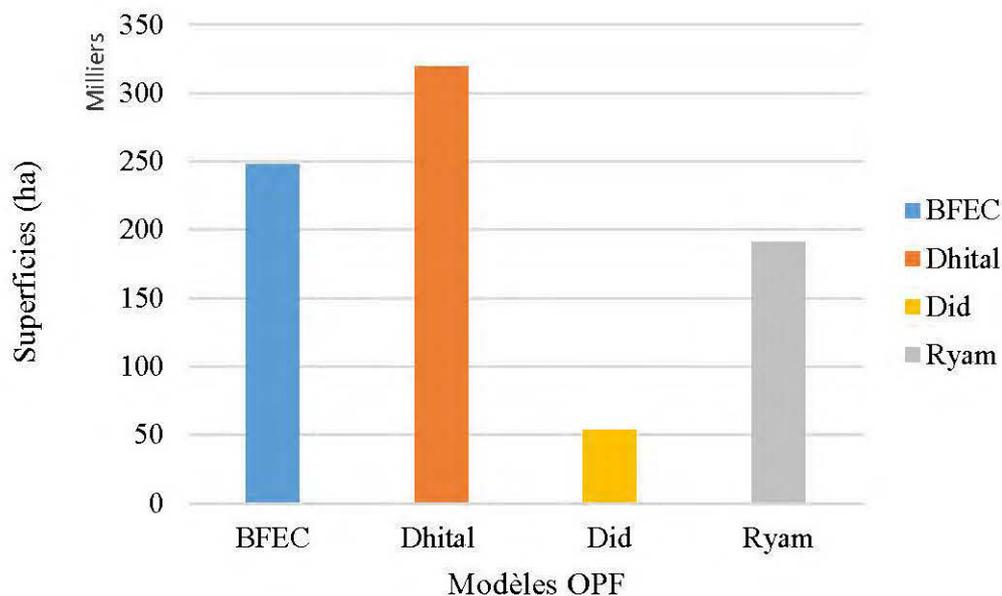


Figure 2.3 Superficies totales de toutes les strates ayant comme types écologiques ME1 par modèle OPF

La figure 2.4 présente l'évolution moyenne en volume (m^3/ha) des peuplements de l'ensemble des strates constituées par modèle durant la période de planification. Le résultat nous montre que les volumes marchants (m^3/ha), toutes essences, évoluent différemment selon les modèles OPF.

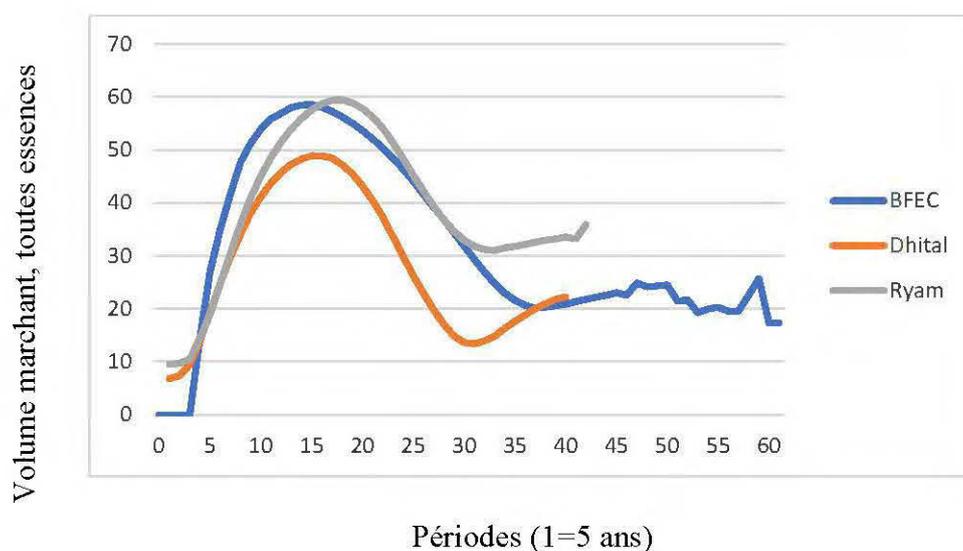


Figure 2.4 Courbe d'évolution moyenne du volume (m^3/ha) des peuplements de l'ensemble des strates de l'UA par modèle OPF en fonction de l'âge.

2.4.2 Effet du regroupement des strates combiné à des proportions variables des coupes partielles sur le volume récoltable.

L'évolution du volume sur pied du groupe d'essence des SEPM par périodes de planification pour les modèles BFEC, Dhital et Ryam est présentée dans la figure 2.5. Les volumes sur pied du groupe de SEPM issus des modèles BFEC et Ryam sont plus élevés que celui du modèle Dhital, durant toutes les trente (30) périodes de planification. On note que le volume sur pied du groupe des SEPM issues du modèle Ryam est plus élevé sur certains intervalles pour les périodes de planification ([6-14] et [20-30]). Nous constatons également qu'il s'est créé une distorsion à la période 30, pour les trois (3) modèles, dus certainement aux erreurs de manipulation du modèle.

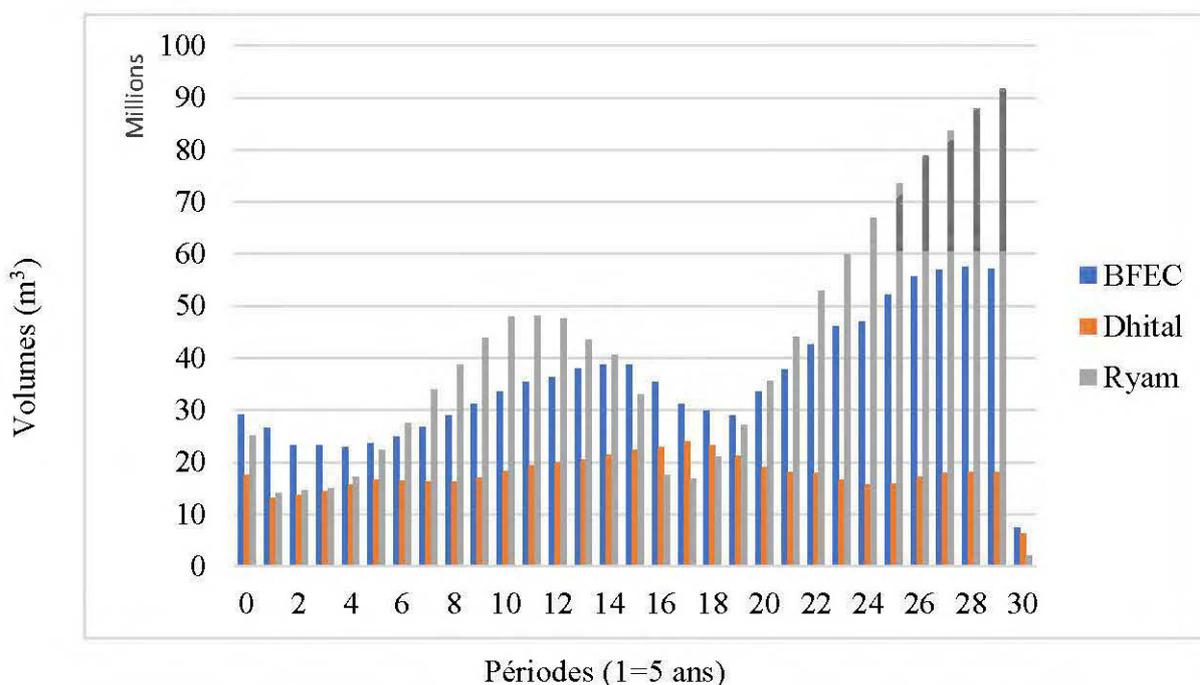


Figure 2.5 Évolution du volume (m^3) sur pied du groupe de SEPM par modèle OPF pour 30 périodes de 5 ans de planification au début de l'optimisation.

La figure 2.6 présente le volume récoltable moyen du groupe d'essence des SEPM et la superficie récoltée en coupe partielle, en fonction des proportions de coupe

partielle. On constate, pour les trois modèles OPF, que le pourcentage de superficie récoltée en coupe partielle suit l'augmentation des proportions de coupe partielle mise comme contrainte dans les modèles. Mais au scénario sans contrainte (0% de CP), les modèles BFEC, Dhital et Ryam réalisent respectivement 20%, près de 60% et 15% de superficie récoltée en coupe partielle.

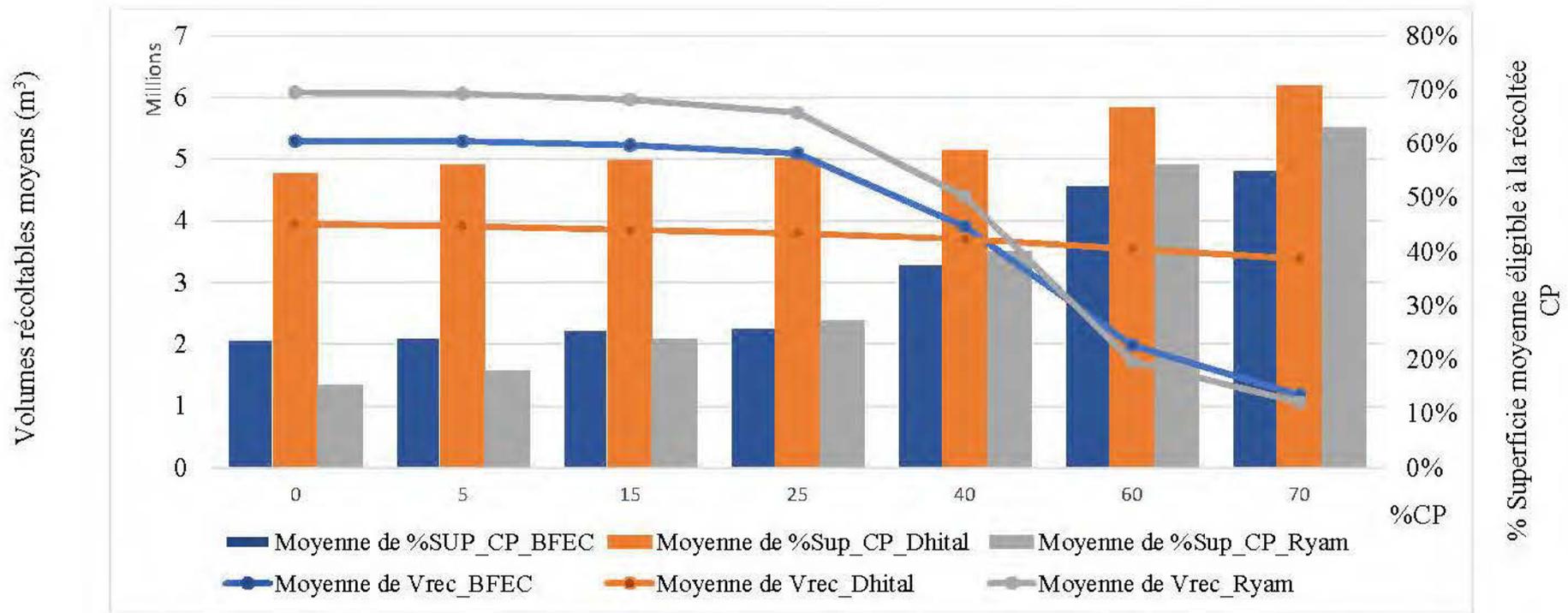


Figure 2.6 : Volume récoltable moyen (Vrec) du groupe SEPM et superficie moyenne récoltée en CP (%Sup_CP) par modèle OPF, en fonction des proportions des coupes partielles.

Quant au volume récoltable moyen du groupe des SEPM, on constate qu'il décroît dépendamment de l'augmentation des proportions des superficies récoltables en coupe partielle. On observe une légère baisse de 0% à 15% de CP et une baisse considérable à partir de 25% de CP. Le modèle Ryam procure un volume moyen récoltable du groupe des SEPM plus important que les autres modèles de 0% à 40% de CP. Le modèle Ryam a un volume récoltable du groupe de SEPM de 6 082 773.647 m³ (écart type : 16469272.09), supérieur à ceux résultants des autres modèles (5 293 926.463 m³ (écart type : 8624362.45) pour le BFEC et de 3 945 708.423 m³ (écart type : 6505901.46) Dhital), au scénario sans contraintes (0% de CP).

L'évolution de la valeur relative moyenne du volume récoltable du groupe des SEPM en fonction de la proportion des superficies récoltées en coupe partielle est représentée par la figure 2.7. La valeur relative moyenne du volume récoltable du groupe des SEPM diminue en fonction de l'augmentation de la proportion de superficies réalisée en coupe partielle pour tous les modèles OPF (Ryam, BFEC et Dhital). En revanche pour le modèle Ryam la valeur relative moyenne du volume récoltable du groupe des SEPM est plus élevée, quelle que soit la proportion de superficies récoltée en coupe partielle.

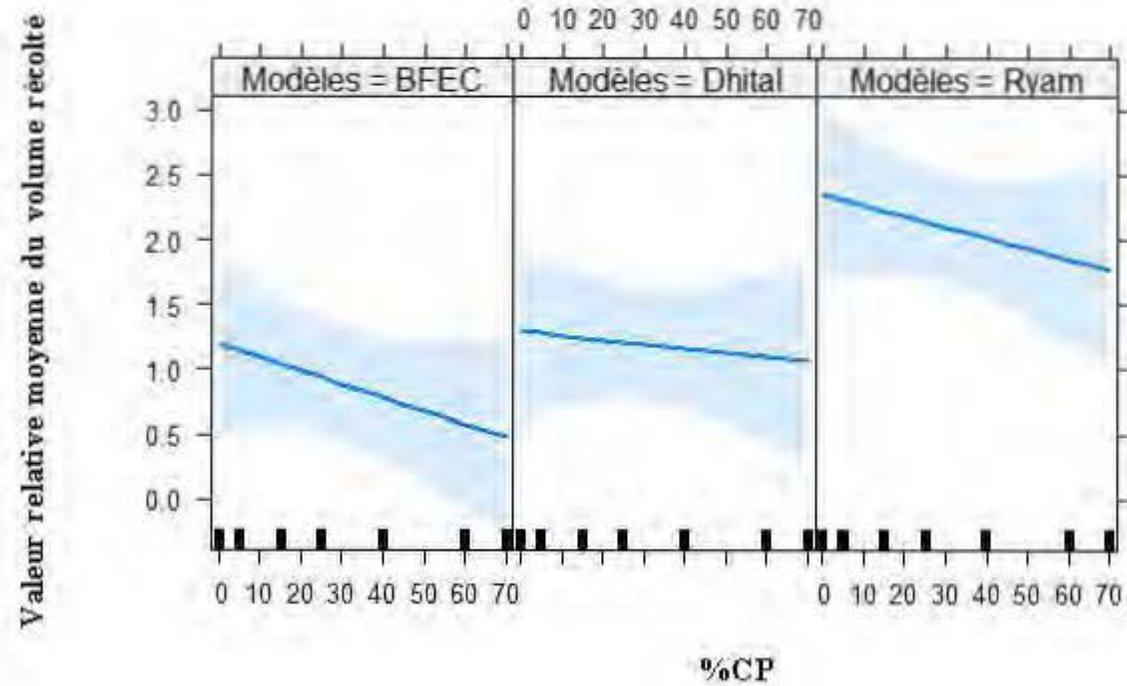


Figure 2.7 Valeur relative moyenne du volume récolté SEPM (MPVRec) réalisé par modèle, en fonction des proportions de superficies réalisés en CP.

Tableau 2.5 Sélection des modèles candidats de la régression linéaire multiple prédisant le volume récoltable en fonction des modèles d'OPF, des proportions de coupe partielle exigées et des périodes de planification. Le modèle en gras est le modèle sélectionné.

Modèle	K	AICc	Δ AICc	w AICc
Mod2	109	9866.73	0.00	1.000
Mod3	51	10030.35	163.62	0.000
Mod4	39	10044.45	177.72	0.000
Mod1	283	10125.93	259.20	0.000
Mod8	31	10136.44	269.70	0.000
Mod7	8	10623.59	756.86	0.000
Mod5	10	10624.77	758.03	0.000
Mod6	4	10651.56	784.83	0.000

K : Nombre de paramètres du modèle, AICc : Critère d'information d'Akaike corrigé, Δ AICc : Différence d'AICc, w AICc: Poids d'AICc du modèle

Tableau 2.6 Résultat de la régression linéaire du mod2 ($\alpha \leq 0.05$)

Variables	Df	Sum_Sq	P_Value
Modèles OPF	-2.695	0.868	0.0026
%CP	3.776	1.020	<0.0001
Périodes	-0.409	0.341	<0.0001
Modèles : %CP	0.000	0.003	0.0001
Modèles : Périodes			<0.0001

Les résultats, de l'analyse statistique, montrent que toutes les variables explicatives ont un effet significatif sur le volume récoltable (Tableau 2.4 et 2.5). La réponse des modèles d'optimisation de la possibilité forestière dépend donc du nombre de groupes de strates, du pourcentage de coupe partielle simulé et des interactions entre elles. Le fait que les coupes partielles sont modélisées en fonction du regroupement des strates justifie l'effet significatif qu'a cette interaction (modèle : %CP) dans la réponse du modèle. Les variables intégrées dans le mod2 expliquent 77% ($R^2=0.77$) de la variabilité du volume récoltable optimisé (volume admissible à la récolte après résultat du calcul de la possibilité forestière).

2.5 Discussion

Les résultats obtenus montrent respectivement que les différents modèles OPF présentent des superficies totales des strates SEPM, moyennes occupées par différentes classes d'âge et totales des strates des pessières à peuplier faux-tremble (ME1) différentes même s'il s'agit d'un même territoire forestier (UA 85-51). Ces modèles ont été exécutés sans contraintes. Ces superficies sont aussi différentes de celle issue des données d'inventaire du 4^e décennales. On observe également des courbes d'évolution des volumes marchants toutes essences confondues différentes. Sachant que le territoire forestier est décrit dans les modèles d'optimisation à travers les caractéristiques des différents groupes de strates (Gouvernement, 2013b; Poulin, 2013) et que les modèles OPF n'ont pas encore été optimisés, nous en déduisons que le nombre de regroupements de strates utilisé dans différents modèles OPF a eu un effet sur la répartition spatiale (superficie) des strates SEPM, des différentes classes d'âge, des pessières à peuplier faux-tremble et sur le volume marchant accessible toutes essences confondues.

Notre revue littérature montre que lors de l'optimisation, du volume maximal exploitable, le logiciel Woodstock Remsoft® s'appuie sur les caractéristiques des différentes courbes d'évolutions des groupes de strates et le volume récoltable est calculé après application des différents traitements sylvicoles (CPRS,

CP)(Gouvernement, 2013b; Poulin, 2013). Ces courbes d'évolution des différents groupes de strates donnent les caractéristiques du peuplement (diamètre moyen et hauteur dominante) en fonction des caractéristiques du bois initial (diamètre moyen, volume/ha, hauteur dominante, âge) échantillonné et issu des différentes strates regroupées (David et Isabelle, 2011; Gouvernement, 2013b).

Nous comprenons que le regroupement de strates, en fonction des caractéristiques (données dendrométriques) des strates regroupées, réalisé dans les différents modèles OPF a un effet sur les courbes d'évolution des peuplements et la modélisation des coupes partielles dans l'optimisation du volume récoltable. En effet, les résultats montrent que les volumes sur pied et les volumes récoltables sont différents entre les modèles OPF (figure 2.5, 2.6 et 2.7).

Les résultats montrent également que le modèle comportant un plus grand nombre de strates regroupées offre plus d'opportunité en volume initial et lorsqu'on augmente la proportion de superficies à récolter en coupe partielle. Par exemple on observe que le volume sur pied du groupe des SEPM issues du modèle Ryam est plus élevé sur certaines d'intervalle des périodes de planification ([6-14] et [20-30]). Ainsi, nous déduisons que l'optimisation du volume récoltable, réalisée avec des strates moins regroupées, nous permettrait d'avoir plus d'opportunité en volume sur pied disponible dans les modèles OPF et d'augmenter l'usage des coupes partielles.

Nos résultats montrent que les modèles sont capables d'atteindre une certaine proportion de superficies récoltable en coupe partielle lorsque la coupe partielle n'est pas sollicitée (figure 2.6). Ainsi, une fois les coupes partielles modélisées, le modèle d'optimisation propose toujours des superficies à réaliser en coupe partielle. Et que la valeur relative du volume récoltable du modèle Ryam est élevée par rapport à celle des autres modèles OPF, confirme que l'usage des coupes partielles entraîne une baisse du volume récoltable. Nous en déduisons que le modèle Ryam est flexible à l'intégration des coupes partielles sachant qu'il offre plus d'opportunité en volume récoltable malgré une valeur relative du volume récoltable

élevé. Tous ces résultats confirment que l'optimisation de la possibilité forestière dépend beaucoup de ces paramètres (Dhital et al., 2015; Pasturel, 2013; Volpé, 2007).

Dans le cadre de la planification forestière, le risque est défini comme la perte attendue découlant d'un événement particulier pour une zone et une période de référence donnée (von Gadow, 2000) et qui peut être calculé comme le produit du dommage et sa probabilité (Pasalodos-Tato et al., 2013). Dans le cadre de notre projet d'étude, les sources les plus importantes de risques et d'incertitudes qui peuvent affecter la prise de décision sont :

- (a) incertitude due aux erreurs de prédiction de la croissance des arbres. Cette croissance future des forêts ne peut pas être prédite exactement puisque la croissance de la forêt varie naturellement de façon stochastique (Pasalodos-Tato et al., 2013) et que les inventaires forestiers ne sont pas assez précis avec un nombre insuffisant de parcelles d'échantillonnage au niveau des strates regroupées (Coulombe et al., 2004);
- (b) incertitude sur l'arrivée d'une catastrophe naturelle comme les incendies de forêt, les tordeuses des bourgeons de l'épinette (TBE), le chablis (Pasalodos-Tato et al., 2013) qui entraîne des ruptures de la possibilité d'approvisionnement.

L'outil d'optimisation Woodstock ne permet pas à priori de traiter les variables stochastiques et on anticipe, sans égard à la structure de la forêt, des réponses similaires. Ainsi, nous n'avons pas pris en compte l'incertitude et les risques dans notre étude, car nous n'avons pas le contrôle sur tous les paramètres, source d'incertitude ou de risque, pouvant influencer la possibilité forestière des différents modèles OPF disponibles. Cependant, des études ont montré que les relations entre les variables de la fonction objective et la structure des erreurs a un effet considérable sur les résultats de l'optimisation (Kangas et Kangas, 1999). Nous nous sommes intéressés à l'impact du nombre de groupe de strates qui est une des variables de la fonction objective.

2.6 Conclusion

L'optimisation du volume récoltable est fonction des paramètres tel le choix du regroupement des strates d'aménagement. Le regroupement des strates a une influence sur la structure des différentes classes d'âge des peuplements, les courbes d'évolution des peuplements et sur le volume sur pieds et son évolution pendant la période de planification.

Nos résultats montrent que le modèle ayant plus de groupes de strates procure plus d'opportunité en volume que les modèles ayant moins de groupes de strate. Le modèle avec un nombre important de groupe de strate peut permettre de réaliser jusqu'à 20% de superficie en coupe partielle tout en donnant un volume récoltable semblable au scénario sans contrainte. Et affiche plus de flexibilité à l'augmentation des coupes partielles, car malgré sa valeur relative moyenne du volume récoltable élevé, le modèle Ryam offre plus d'opportunité en volume.

Cependant, nous n'avons pas contrôlé plusieurs paramètres tels que les différentes compositions des strates, la modélisation et les critères d'admissibilité des coupes partielles. En effet, nous avons utilisé trois modèles distincts ayant regroupé les strates et modélisé les coupes partielles différemment.

L'un des enjeux de la gestion écosystémique est le maintien d'une capacité productive et d'émuler les perturbations naturelles secondaires en utilisant plus de coupe partielle, nous recommandons que le calcul des possibilités forestières soit réalisé en regroupant moins les strates forestières si l'objectif est d'augmenté les coupes partielles, ce qui permettrait d'avoir plus de strates avec des superficies éligibles à de tels traitements et que notre étude soit approfondie en utilisant un modèle dont on contrôlera tous les paramètres de l'optimisation.

CHAPITRE III

CONCLUSION GÉNÉRALE

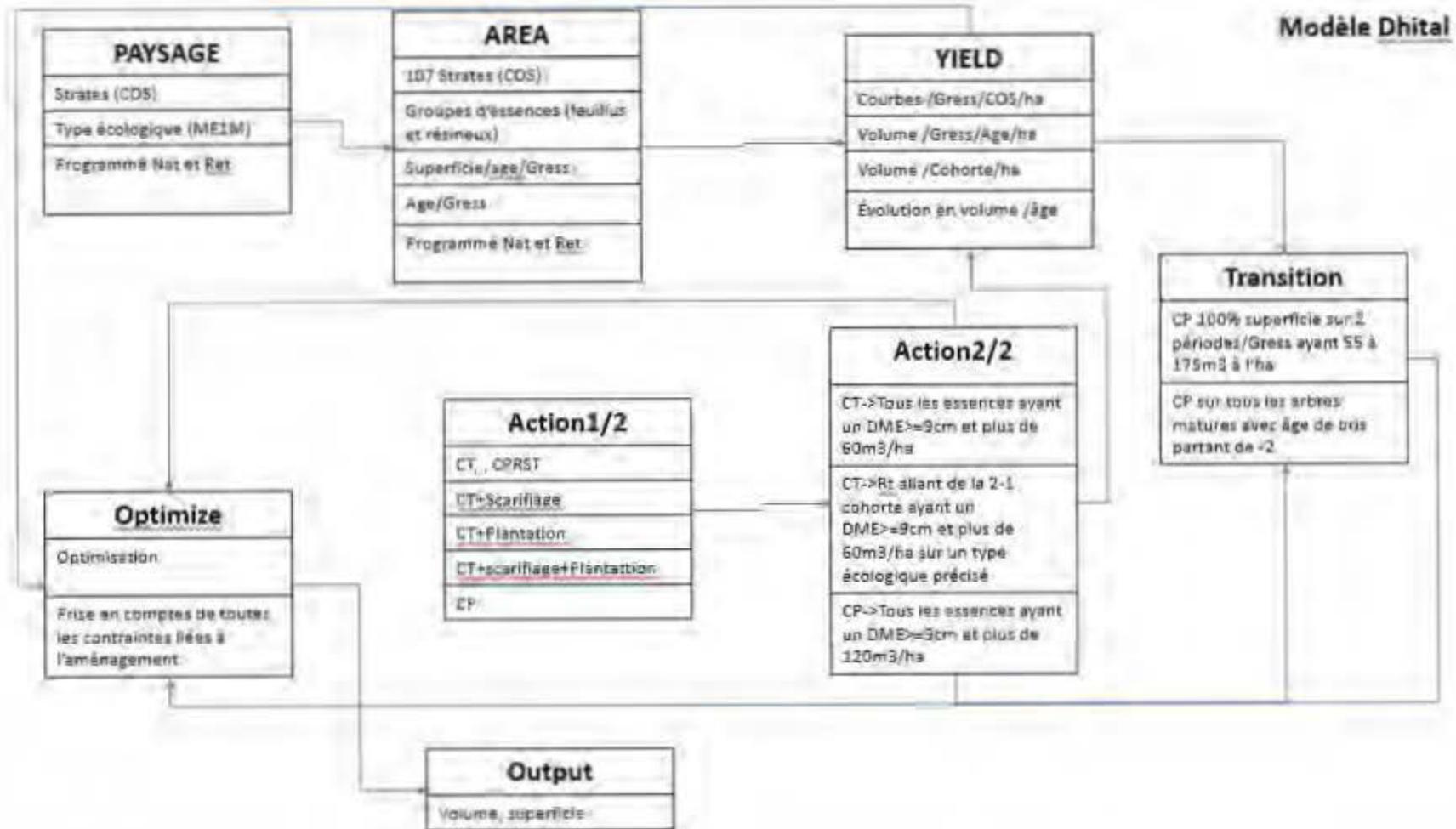
Notre étude avait pour objectif de comprendre l'effet du nombre de strates regroupées sur le calcul de la possibilité forestière lorsqu'une plus grande utilisation de coupe partielle est modélisée et de vérifier qu'un nombre plus élevé de strates regroupées combiné à une proportion variable de coupe partielle dans un modèle d'optimisation génère plus d'opportunité dans la réponse du modèle d'optimisation de la possibilité forestière.

Nous avons montré globalement que le choix du regroupement des strates est très important dans le mécanisme d'optimisation de la possibilité forestière. En effet, les groupes de strates par leurs différentes caractéristiques ont une influence sur l'état initial de la forêt résultant des différents modèles, car les informations dendrométriques contenues dans le groupe de strate dépendent du choix des strates d'aménagement qui ont été regroupées. Ces strates d'aménagement regroupées ont pour caractéristiques les moyennes des moyennes des données dendrométriques issues des strates cartographiques. De plus, les courbes d'évolution des peuplements sont réalisées sur la base des caractéristiques de chaque groupe de strates et les coupes partielles sont modélisées dépendamment de ces mêmes caractéristiques (Gouvernement, 2013b).

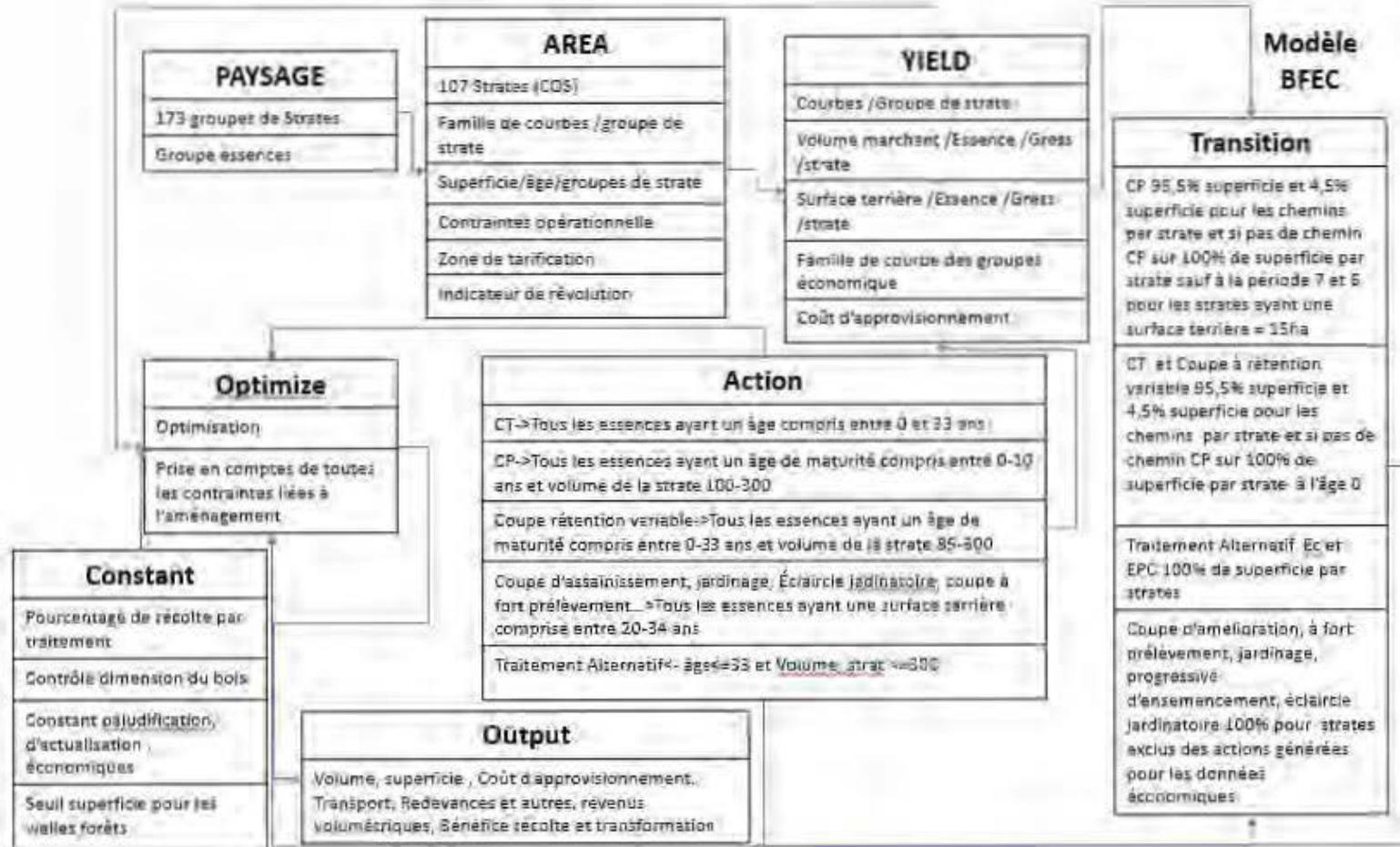
Les résultats de notre étude montrent que le modèle ayant un nombre de groupe de strates important génère plus de souplesse dans la réponse du modèle lorsqu'on augmente la proportion des coupes partiellement. Cependant, nous n'avons pas eu le contrôle de tous les paramètres des différents modèles. Cela a constitué une limite à notre étude. Nous suggérons qu'une étude complémentaire soit réalisée avec le contrôle de tous les paramètres de la modélisation afin de confirmer les résultats obtenus.

Notre étude, nous permet de prendre conscience de l'importance du regroupement des strates d'aménagement, car elles ont un effet significatif sur la possibilité forestière. Nous suggérons que des réflexions soient menées pour mettre en place une procédure de regroupement de strates qui permettra d'optimiser la possibilité forestière en utilisant plus de coupe partielle.

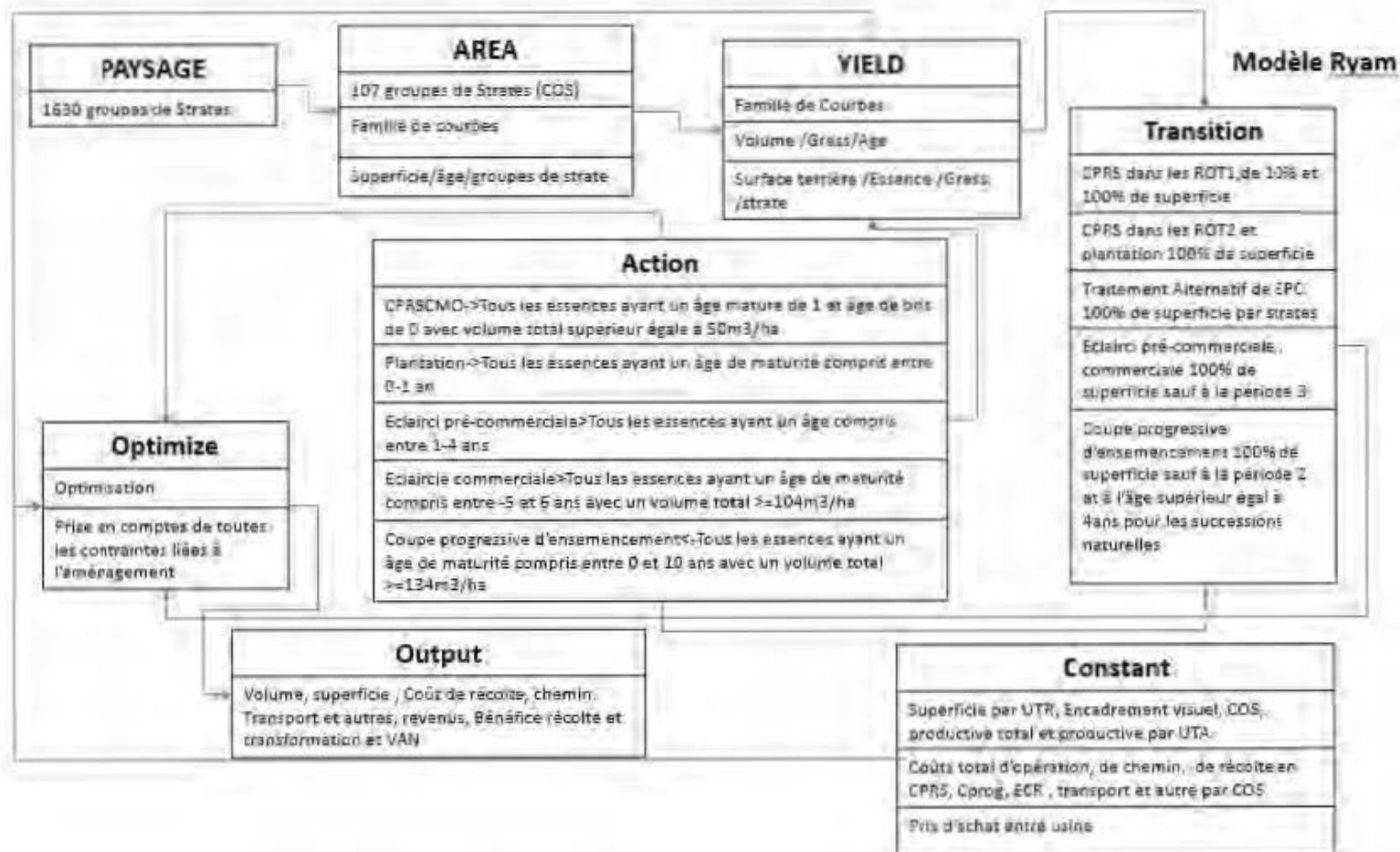
ANNEXE A : Schématisation du modèle d'optimisation Dhital



ANNEXE B: Schématisation du modèle d'optimisation BFEC



ANNEXE C: Schématisation du modèle d'optimisation Ryam



BIBLIOGRAPHIE GENERALE

- Bergeron, J.-F, Pierre Grondin et Blouin., Jacques (1998). "Rapport de classification écologique du sous-domaine bioclimatique de la pessière à mousses de l'ouest", *Ministère des ressources naturelles, Forêt Québec*, 211.
- Bergeron, Yves et Le Goff, Héloïse (2005). "Doit-on remettre en question notre façon d'aménager la forêt boréale canadienne?", *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 6,2.
- Bergeron, Yves, Leduc, Alain, Harvey, Brian D et Gauthier, Sylvie (2002). "Natural fire regime: a guide for sustainable management of the Canadian boreal forest", *Silva fennica*, 36,1, 81-95.
- Bouthillier, Luc (1998). "Brève histoire du régime forestier québécois", *Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Sainte-Foy*.
- Brais, Suzanne, Work, Timothy T, Robert, Émilie, O'Connor, Christopher D, Strukelj, Manuella, Bose, Arun, et al. (2013). "Ecosystem responses to partial harvesting in eastern boreal mixedwood stands", *Forests*, 4,2, 364-385.
- Cimon-Morin, Jérôme, Ruel, Jean-Claude et Darveau, Marcel (2010). "Short term effects of alternative silvicultural treatments on stand attributes in irregular balsam fir-black spruce stands", *Forest Ecology and Management*, 260,5, 907-914.
- Coulombe, Guy, Huot, Jean, Arsenault, Jules, Bauce, E, Bernard, Jean-Thomas, Bouchard, André, et al. (2004). "Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise", *Bibliothèque nationale du Québec*, 302.
- Danneynrolles, Victor (2016). *Reconstitution de la composition des forêts préindustrielles du Témiscamingue (Québec) à partir des archives de l'arpentage primitif*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue,114.
- David, Pothier et Isabelle, Auger (2011). "NATURA-2009 – Un modèle de prévision de la croissance à l'échelle du peuplement pour les forêts du Québec.", *Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière, Québec, Qc*, Mémoire de recherche forestière no 163,76.
- Dhital, Narayan, Raulier, Frédéric, Asselin, Hugo, Imbeau, Louis, Valeria, Osvaldo et Bergeron, Yves (2013). "Emulating boreal forest disturbance dynamics: Can we maintain timber supply, aboriginal land use, and woodland caribou habitat?", *The Forestry Chronicle*, 89,1, 54-65.
- Dhital, Narayan, Raulier, Frédéric, Bernier, Pierre Y., Lapointe-Garant, Marie-Pierre, Berninger, Frank et Bergeron, Yves (2015). "Adaptation potential of ecosystem-based management to climate change in the eastern Canadian boreal forest", *Journal of Environmental Planning and Management*, 58,12, 2228-2249.

- Drushka, Ken (2003a). "Canada's forest: A hiltory", *McGill-Queen's University Press, Montréal, Qc.*
- Drushka, Ken (2003b). *Canada's forests: a history*, McGill-Queen's Press-MQUP,
- Fenton, Nicole J, Imbeau, Louis, Work, Timothy, Jacobs, Jenna, Bescond, Hervé, Drapeau, Pierre, et al. (2013). "Lessons learned from 12 years of ecological research on partial cuts in black spruce forests of northwestern Québec", *The Forestry Chronicle*, 89,3, 350-359.
- Gaudreau, Guy (1999). *Récoltes des forêts publiques au Québec et en Ontario, 1840-1900* (Vol. 9), McGill-Queen's Press-MQUP,
- Gauthier, Sylvie, Vaillancourt, Marie-Andre, Leduc, Alain, Kneeshaw, Daniel, De Grandpré, Louis, Morin, Hubert, et al. (2008). *Aménagement écosystémique en forêt boréale*, Puq, 568.
- Gendreau-Berthiaume, Benoit, Kneeshaw, Daniel D et Harvey, Brian D (2012). "Effects of partial cutting and partial disturbance by wind and insects on stand composition, structure and growth in boreal mixedwoods", *Forestry*, 85,4, 551-565.
- Gouvernement (2012). "Loi sur les forêts du Québec. Règlement sur les normes d'intervention dans les forêts du domaine de l'État".
- Gouvernement du Québec (2015). "STRATÉGIE D'AMÉNAGEMENT DURABLE DES FORÊTS", *Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs*, 38.
- Gouvernement, Québec (2013a). "Création des courbes d'évolution. Calcul des possibilités forestières", Bureau du forestier en chef, 52.
- Gouvernement, Québec (2013b). *Manuel de détermination des possibilités forestières 2013-2018*. Gouvernement du Québec, Roberval, Qc, 247 p.
- Gouvernement, Québec (2014). "Résultats finaux de l'analyse des possibilités forestières période 2013-2018. Unité d'aménagement 085-51", 20.
- Gouvernement, Canada (2016). "L'État des forêts au Canada : Rapport annuel 2016".
- Hébert, Yves (2006). *Une histoire de l'écologie au Québec: les regards sur la nature des origines à nos jours*, Québec: Éditions GID,
- Hynynen, Jari (1993). "Self - thinning models for even - aged stands of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula*", *Scandinavian Journal of Forest Research*, 8,1-4, 326-336.
- Hynynen, Jari (1995). "Predicting the growth response to thinning for Scots pine stands using individual-tree growth models", *Silva Fennica* 29(3), 225-246.
- Imbeau, Louis et Desrochers, André (2002). "Foraging ecology and use of drumming trees by three-toed woodpeckers", *The Journal of wildlife management*, 222-231.
- Kangas, Annika S (1997). "On the prediction bias and variance in long-term growth projections", *Forest Ecology and Management*, 96,3, 207-216.

- Kangas, Annika S et Kangas, Jyrki (1999). "Optimization bias in forest management planning solutions due to errors in forest variables", *Silva Fennica* 33(4), 303–315.
- Kimmins, JP (2004). "Emulating natural forest disturbance: what does this mean", *Emulating natural forest landscape disturbance*. Columbia University Press, New York, 8-28.
- Kouki, Jari et Väänänen, Anne (2000). "Impoverishment of resident old-growth forest bird assemblages along an isolation gradient of protected areas in eastern Finland", *Ornis Fennica*, 77,4, 145-154.
- Laasasenaho, Jouko (1982). *Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt*. Commun.Inst.For.Fenn. 108, 1-74.
- Latrémouille, Charles (2008). "Impacts d'un aménagement forestier écosystémique sur la mosaïque forestière et sur les coûts d'approvisionnement en bois: étude de cas de la forêt d'enseignement et de recherche du Lac Duparquet".
- Le Blanc, Mélanie-Louise, Fortin, Daniel, Darveau, Marcel et Ruel, Jean-Claude (2010). "Short term response of small mammals and forest birds to silvicultural practices differing in tree retention in irregular boreal forests", *Ecoscience*, 17,3, 334-342.
- Mazerolle, Marc J (2006). "Improving data analysis in herpetology: using Akaike's Information Criterion (AIC) to assess the strength of biological hypotheses", *Amphibia-Reptilia*, 27,2, 169-180.
- Meek, P (2000). "Productivité et coûts de l'abattage-façonnage mécanisé en éclaircie commerciale : rapport synthèse", *Inst. can. rech. génie for (FERIC), Pointe-Claire, QC. Avantage 1 (41), 4 p.*
- Moore, Thomas Y, Ruel, Jean-Claude, Lapointe, Marc-André et Lussier, Jean-Martin (2011). "Evaluating the profitability of selection cuts in irregular boreal forests: an approach based on Monte Carlo simulations", *Forestry*, cpr057.
- MRN (2013). "Le guide sylvicole du Québec. Tome 2 – Les concepts et l'application de la sylviculture. Ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier. ", *Les Publications du Québec, Québec, Qc*, 744 p.
- Pasalodos-Tato, M, Mäkinen, A, Garcia-Gonzalo, J, Borges, JG, Lämås, T et Eriksson, LO (2013). "Review. Assessing uncertainty and risk in forest planning and decision support systems: review of classical methods and introduction of new approaches", *Forest Systems*, 22,2, 282-303.
- Pasturel, Thibault (2013). "Étude de la rentabilité de différentes stratégies d'aménagement forestier en forêt boréale du nord de l'Abitibi", 137.
- Pothier, David et Savard (1998). *Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec*, [Québec]: Ministère des ressources naturelles, Forêt Québec, 183.
- Poulin, Julie (2013). "Création des courbes d'évolution. Calcul des possibilités forestières 2013-2018", *Bureau du forestier en chef, Roberval, Qc*, 53 p.

- Prévost, Marcel et Pothier, David (2003). "Partial cuts in a trembling aspen conifer stand: effects on microenvironmental conditions and regeneration dynamics", *Canadian Journal of Forest Research*, 33,1, 1-15.
- Raulier, F, Leduc, A, Roy, R et Vaillancourt, MA (2009). "Aménagement de la forêt", *Manuel de foresterie*. Edited by R. Doucet and M. Côté. Éditions MultiMonde, Sainte-Foy, Qué.
- Raulier, Frédéric, Dhital, Narayan, Racine, Pierre, Tittler, Rebecca et Fall, Andrew (2014). "Increasing resilience of timber supply: how a variable buffer stock of timber can efficiently reduce exposure to shortfalls caused by wildfires", *Forest Policy and economics*, 46, 47-55.
- Rauscher, H Michael (1999). "Ecosystem management decision support for federal forests in the United States: a review", *Forest ecology and management*, 114,2, 173-197.
- RDevelopment CORE TEAM, R (2008). R: A language and environment for statistical computing: R foundation for statistical computing Vienna, Austria.
- Remsoft (2006). "Woodstock User Guide", *Remsoft Inc*, 280.
- RLRQ Chapitre A-18, 1 " Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier. Document disponible en ligne: <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/>", Document disponible en ligne: <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/>
- Ruel, J-C, Roy, V, Lussier, J-M, Pothier, D, Meek, P et Fortin, D (2007). "Mise au point d'une sylviculture adaptée à la forêt boréale irrégulière", *The Forestry Chronicle*, 83,3, 367-374.
- Ruel, Jean-Claude, Fortin, Daniel et Pothier, David (2013). "Partial cutting in old-growth boreal stands: an integrated experiment", *The Forestry Chronicle*, 89,3, 360-369.
- Tembec (2012). "Evaluation des impacts de différents scénarios d'aménagement écosystémique en comparaison au RNI".
- Thorpe, HC, Thomas, SC et Caspersen, JP (2007). "Residual-tree growth responses to partial stand harvest in the black spruce (*Picea mariana*) boreal forest This article is one of a selection of papers published in the Special Forum IUFRO 1.05 Uneven-Aged Silvicultural Research Group Conference on Natural Disturbance-Based Silviculture: Managing for Complexity", *Canadian Journal of Forest Research*, 37,9, 1563-1571.
- Volpé, Sylvain (2007). *Analyse des impacts opérationnels et financiers d'un aménagement écosystémique dans la région de la Côte-Nord: le cas de l'Île René-Levasseur*. Université Laval.
- von Gadow, Klaus (2000). "Evaluating risk in forest planning models", *Silva Fennica*, 34,2, 181-191.
- Vuokila, Yrjö et Valiaho, H (1980). *Growth and yield models for conifer plantations in Finland* (Vol. 99),