

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	5
1.1 Mise en contexte	5
1.2 Statistiques forestières dans la province du Québec	6
1.3 Parties prenantes	7
1.3.1 Gouvernements	7
1.3.2 Entreprises forestières	8
1.3.3 Autres parties prenantes	9
1.4 Processus de planification	9
1.5 Problématique	12
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	15
2.1 Processus de planification	15
2.1.1 Définition des niveaux de planification	16
2.1.1.1 Planification stratégique	16
2.1.1.2 Planification tactique	17
2.1.1.3 Planification opérationnelle	17
2.1.2 Interdépendance des niveaux de planification	18
2.1.3 Constat	19
2.2 Méthodes d'intégration de plusieurs niveaux de planification	20
2.2.1 Différents types de divergences lors de la planification	20
2.2.2 Approches hiérarchiques	22
2.2.3 Fonction d'anticipation de Schneeweiss	24
2.3 Planification dans le secteur forestier	27
2.3.1 Processus de planification	27
2.3.2 Intégration de plusieurs niveaux de planification	28
2.4 Problèmes de localisation et d'allocation	29
2.4.1 Problèmes de localisation	29
2.4.2 Problèmes d'allocation	31
2.4.3 Modèles utilisés dans cette recherche	31
2.4.3.1 Modèle d'allocation des ressources	32
2.4.3.2 Modèle de localisation des chantiers de coupe	32
2.5 Conclusion	33
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	35
3.1 Introduction	35
3.2 Hypothèses de travail	35
3.3 Modèle de planification intégrée	37
3.3.1 Ensembles et indices	37
3.3.2 Modèle d'allocation des ressources aux usines	38

3.3.2.1	Paramètres.....	38
3.3.2.2	Variables de décisions.....	39
3.3.2.3	Fonction-objectif.....	39
3.3.2.4	Contraintes.....	39
3.3.3	Modèle de localisation des chantiers de coupe.....	40
3.3.3.1	Paramètres.....	40
3.3.3.2	Variables de décisions.....	41
3.3.3.3	Fonction-objectif.....	42
3.3.3.4	Contraintes.....	42
3.3.3.5	Contraintes de couplage.....	43
CHAPITRE 4 EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS.....		45
4.1	Données relatives à la planification des ressources forestières.....	45
4.2	Méthode de génération des scénarios.....	47
4.3	Résultats de l'étude de cas.....	48
4.4	Analyse des résultats.....	55
4.5	Recommandations.....	58
CONCLUSION.....		63
ANNEXE I VALEURS DES PARAMÈTRES DE L'ÉTUDE DE CAS.....		67
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		69

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 4-1	Essences et qualités de bois disponibles dans les unités d'aménagement étudiées46
Tableau 4-2	Résultats de la fonction-objectif en m ³ pour les six scénarios du modèle d'allocation des ressources49
Tableau 4-3	Résultats des écarts des coûts d'approvisionnement pour les usines en \$ pour les sous-scénarios du modèle de localisation des chantiers de coupe52
Tableau 4-4	Informations supplémentaires sur les solutions obtenues pour chaque sous-scénario avec une planification intégrée (I).....54
Tableau 4-5	Informations supplémentaires sur les solutions obtenues pour chaque sous-scénario avec une planification hiérarchique (H).....54
Tableau 4-6	Écart en % entre les résultats de la fonction-objectif des sous-scénarios avec la planification hiérarchique et des sous-scénarios avec planification intégrée58
Tableau 4-7	Tableau comparatif des avantages et des limites de la méthode étudiée dans ce mémoire61

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1-1	Processus de planification des ressources forestières au Québec11
Figure 1-2	Représentation du processus d'allocation des ressources forestières.....13
Figure 1-3	Représentation du processus de localisation des chantiers de coupe.....13
Figure 2-1	Pyramide hiérarchique des niveaux de planification18
Figure 2-2	Structure d'un système de planification hiérarchique26
Figure 4-1	Génération des scénarios pour la planification intégrée47
Figure 4-2	Graphique comparatif des résultats de la fonction-objectif en \$ pour les sous-scénarios de planification hiérarchique pure (H) et la moyenne des sous-scénarios avec fonction d'anticipation (I).....53

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BFEC	Bureau du Forestier en Chef
BMMB	Bureau de Mise en Marché des Bois
BRIC	Brésil, Russie, Inde et Chine
CFLP	Conception du réseau de la chaîne d'approvisionnement (<i>Capacited Facility Location Problem</i>)
GA	Garantie d'Approvisionnement
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
SCND	Problème de localisation d'installations avec capacité (<i>Supply Chain Network Design</i>)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

m ³	mètre cube
\$	dollars
\$/m ³	dollars par mètre cube

INTRODUCTION

Un projet est considéré comme « bon » quand il atteint les meilleures performances possibles dans des délais courts et avec de faibles coûts. Pour y parvenir, les gestionnaires ont toujours porté un soin important à planifier leurs projets.

Il existe trois niveaux de planification qui ont des objectifs différents : objectifs à long terme, à moyen terme ou à court terme. Ainsi, une planification stratégique oriente les actions des acteurs du projet vers les objectifs à long terme de l'organisation tout en répondant aux exigences du marché et des parties prenantes. Une planification tactique permet de prévoir les ressources à mettre en œuvre à moyen terme pour atteindre les objectifs fixés par la planification stratégique. Une planification opérationnelle permet de réaliser les objectifs fixés à plus court terme, voire quotidiennement.

Pour avoir des objectifs stratégiques réalisables à court terme, il faut réaliser la planification stratégique avant la planification tactique, qui elle-même doit être réalisée avant la planification opérationnelle. Si des écarts viennent à exister entre la planification de deux niveaux, il faut faire des réajustements. Il peut également arriver que la planification stratégique se montre irréalisable lors de la planification opérationnelle. Deux choix s'offrent alors aux gestionnaires : 1) refaire une planification stratégique avec davantage de contraintes ou 2) mettre en place un plan opérationnel qui ne correspond pas à la planification stratégique initiale. Dans les deux cas, il est fort possible que le projet soit réalisé avec des coûts supplémentaires et avec du retard.

Pour éviter ces problèmes, l'intégration d'au moins deux niveaux de planification dans un modèle d'optimisation pourrait être une solution à envisager. Par manque de puissance de calcul, les premiers modèles d'optimisation se sont focalisés sur un seul niveau de planification. Aujourd'hui, la majorité des gestionnaires utilisent encore ce type de modèle d'optimisation. Cependant, l'évolution des méthodes de gestion industrielle et celle des puissances de calculs permettent d'augmenter la taille des problèmes étudiés. Depuis les

années 90, les chercheurs s'intéressent à ce problème et ont développé différentes méthodes : fonction d'anticipation, analyse de décisions multi-objectifs, approche dynamique des prix, méthode de décomposition, relaxation lagrangienne et décomposition lagrangienne.

La recherche présentée dans ce mémoire adapte la méthode de Schneeweiss (2012) qui utilise une fonction d'anticipation pour permettre l'intégration de deux niveaux de planification dans le secteur forestier. Cette fonction d'anticipation permet, au niveau en amont, d'anticiper les décisions et les résultats du niveau suivant, afin d'optimiser le résultat global des deux entités. Schneeweiss (2012) présente plusieurs exemples simples dans le secteur de la production dans son livre et dans plusieurs de ses articles (Schneeweiss, 2003 ; 2012 ; Schneeweiss & Zimmer, 2004). Cette méthode a été utilisée par Beaudoin, Frayret, & LeBel (2008) dans le secteur forestier. Le modèle de Beaudoin et al. (2008) se concentre sur l'intégration des niveaux tactique et opérationnel pour un problème de planification de la capacité de récolte dans le domaine forestier. Les auteurs ont travaillé sur l'intégration des objectifs opérationnels suivants : décisions sur le séquençage et le transport des équipements ainsi que sur l'allocation détaillée des ressources. D'autres auteurs ont traité de la question de l'allocation avec des méthodes de programmation par buts, de programmation multi-objectifs et de relaxation lagrangienne. Cependant, aucune recherche n'a porté sur l'intégration du problème de localisation des chantiers de coupe et du problème d'allocation du bois aux usines de transformation.

Cette recherche présente une méthode d'intégration de deux modèles : 1) un sur l'allocation des ressources et 2) un sur la localisation des chantiers de coupe dans le secteur forestier. Les deux modèles utilisés sont une adaptation des modèles de Boukherroub, LeBel, & Ruiz (2017b) et de Ouhimmou, Haddad, & Boukherroub (2015). Le premier modèle permet au Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) de déterminer les volumes de bois à allouer aux usines détentrices de contrat d'approvisionnement par unité d'aménagement. Le second modèle détermine les chantiers de coupe à ouvrir afin de respecter les volumes à allouer, déterminés auparavant, aux usines. Cependant, lors de la résolution du premier modèle, la spatialisation des volumes n'est pas prise en compte et les volumes de bois ne sont pas connus avec précision.

Ceci entraîne un écart entre les volumes à allouer et les volumes réellement disponibles sur le terrain.

L'objectif principal de cette recherche est d'assurer que les décisions tactiques soient en harmonie avec les objectifs opérationnels dans le secteur forestier, afin de réduire les écarts entre les objectifs de planification des deux niveaux et plus précisément, entre le modèle d'allocation des ressources forestières et le modèle de localisation des chantiers de coupe. Pour atteindre cet objectif, plusieurs objectifs spécifiques sont fixés pour cette recherche :

- Trouver une méthode d'intégration de deux niveaux de planification à l'aide du concept de fonction d'anticipation de Schneeweiss (2012),
- Développer un modèle mathématique reprenant la méthode de Schneeweiss (2012) pour intégrer les deux modèles du secteur forestier,
- Valider ce nouveau modèle en le programmant,
- Résoudre et obtenir des résultats d'une étude de cas,
- D'analyser les résultats obtenus et d'évaluer ceux-ci au moyen d'une analyse par scénario.

Ce document est composé de quatre chapitres. Le chapitre 1 présente le secteur forestier au Canada, et plus précisément au Québec avec une visualisation de ses enjeux et la problématique de recherche. Le chapitre 2 est consacré à un état de l'art sur les différents modèles de planification existants qui permet de conforter le choix d'orientation de cette recherche. Le chapitre 3 décrit la méthodologie mise en œuvre. Enfin, le chapitre 4 analyse les résultats obtenus et fournit les recommandations. Les limites du modèle sont discutées à la fin de ce chapitre avec les perspectives de recherche possibles.

CHAPITRE 1

MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

1.1 Mise en contexte

Les ressources naturelles du Canada sont variées et présentes en quantité sur son territoire : produits forestiers, produits miniers et pétroliers, l'eau, etc. Ces ressources sont une importante source économique pour le Canada. Toutefois, les Canadiens sont conscients de la précarité des ressources naturelles si elles ne sont pas gérées de manière durable. C'est pourquoi plusieurs démarches de contrôle et de gestion des ressources naturelles ont été mises en place.

Le Canada possède environ 347 millions d'hectares de forêts, ce qui représente près de 9 % des forêts de la planète. Le Canada est le deuxième plus important exportateur de produits forestiers de base au monde. Près de 94 % des terrains forestiers canadiens sont publics, c'est-à-dire qu'ils appartiennent à l'État et sont gérés par les gouvernements provinciaux, territoriaux et fédéraux. Pour ces forêts, chaque gouvernement peut créer et faire appliquer des lois, règlements et politiques de façon à respecter les règles d'aménagement forestier durable à l'échelle du pays. Les 6 % restant des terrains forestiers canadiens sont privés et fournissent environ un dixième de bois récolté au Canada. Dans la plupart des cas, l'aménagement forestier sur ces terres privées est régi par des règlements municipaux et soutenu par des lignes directrices ou des programmes volontaires provinciaux. Cependant, dans certaines provinces, les lois établissent des normes qui encadrent les politiques d'aménagement forestier de ces terres (<http://www.rncan.gc.ca/forets/rapport/zone-forestiere>).

Les bois coupés dans ces forêts sont certifiés par plusieurs organismes et assurent au marché international qu'ils proviennent de forêts gérées de façon durable. Sur 180 espèces d'arbres présentes au Canada, seules 35 sont exploitées à des fins commerciales. Cependant, dans les régions où ces espèces sont rares, elles sont protégées par des règlements et des plans d'aménagement forestiers approuvés par le gouvernement qui interdisent leur récolte. Le Canada est reconnu comme étant une source de produits forestiers durables et d'origine légale.

Le Canada gère ses forêts de manière à optimiser ses revenus économiques, tout en prenant en compte plusieurs facteurs : créer des possibilités économiques pour les collectivités, respecter les droits ancestraux et issus de traités, protéger la faune et la flore, préciser des pratiques de récolte et de régénération, empêcher l'exploitation illégale des forêts et l'importation illégale de bois. En 2013, l'industrie forestière canadienne employait directement et indirectement 321 300 personnes. Les emplois de ce secteur vont de l'aménagement forestier, la sylviculture et l'exploitation forestière à l'exploitation de scieries et aux activités de fabrication et commercialisation (www.rncan.gc.ca/forets/canada).

1.2 Statistiques forestières dans la province du Québec

Les forêts du Québec représentent 20 % des forêts canadiennes et 2 % des forêts mondiales. Les forêts québécoises sont situées dans trois grandes zones bioclimatiques qui présentent chacune des caractéristiques bien particulières : 1) Forêt Boréale, 2) Forêt Mélangée et 3) Forêt Feuillue. Les principales essences que l'on peut trouver sont l'épinette noire, le sapin baumier et le bouleau blanc pour la Forêt Boréale ; le bouleau jaune et le sapin baumier pour la Forêt Mélangée ; et l'érable à sucre et le bouleau jaune pour la Forêt Feuillue. La gestion des forêts publiques québécoises est encadrée par la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier. À la fin de l'année 2012, le Québec comptait 30 millions d'hectares certifiés par au moins l'un des trois systèmes de certification forestière : 77 % avec la norme du *Forest Stewardship Council*, 20 % avec la norme du *Sustainable Forestry Initiative* et 3 % avec la norme de l'Association Canadienne de Normalisation. Au 1er avril 2013, près de 90 % des superficies productives des forêts publiques du Québec étaient certifiées, soit environ 32 millions d'hectares.

En 2012, les principaux marchés d'exportation des produits forestiers québécois étaient les États-Unis, les pays du BRIC (Brésil, Russie, Inde et Chine), suivi du Royaume-Uni. La valeur des exportations des produits forestiers était de 6,9 milliards de dollars répartis en 1,7 milliard de dollars de produits du bois et 5,2 milliards de dollars en produits de l'industrie des pâtes et

papiers. Les forêts privées appartiennent à près de 130 000 propriétaires, et fournissent de 20 % à 23 % des approvisionnements de bois rond. Toutes les billes provenant des terres publiques et privées doivent avoir été mesurées avant la transformation, afin que les prix soient établis et réglés selon les normes en vigueur et d'éviter toute coupe illégale.

Suite à la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier, et l'enjeu qui en découle, le Ministère des Ressources Naturelles prend à sa charge plusieurs responsabilités qui étaient auparavant dévolues à l'industrie forestière, dont la préparation de la planification forestière.

1.3 Parties prenantes

Plusieurs acteurs sont présents lors de la prise de décisions pour la gestion des ressources forestières. Le gouvernement, les entreprises du secteur forestier, les organismes de certification et les peuples autochtones ont tous un effet sur le processus de planification de la gestion de ces ressources.

1.3.1 Gouvernements

Le Canada est une fédération formée de dix provinces et trois territoires. Chaque province et territoire met en place son propre ensemble de lois et politiques liées aux forêts qui visent toutes un même but : une gestion durable des forêts.

Les provinces et les territoires utilisent une variété d'arrangements liés à la tenure, pour octroyer des droits et des responsabilités aux entreprises exploitant les forêts publiques. Ces ententes n'accordent pas nécessairement le droit de récolter de la matière ligneuse. La tenure forestière est une entente définie concernant des particuliers ou des groupes, reconnue par la loi ou la coutume et comprenant un ensemble de droits et de responsabilités entourant la propriété et/ou l'utilisation d'une section de territoire ou des ressources qui s'y trouvent, ainsi que l'accès à ce territoire ou à ces ressources. Les permis d'aménagement forestier octroyés au Canada le sont selon des modes de tenure basés sur la superficie ou sur le volume. Le type de tenure octroyé à une entreprise dépend de la province. Tous les gouvernements reçoivent des

redevances pour les bois récoltés sur les terres publiques. Ces redevances, soit les recettes tirées des droits de coupe, sont perçues par les gouvernements provinciaux et territoriaux.

Depuis le 1^{er} avril 2013, le bois disponible à la récolte sur les terres publiques est alloué de deux façons. Environ 25 % sont vendus selon un mécanisme d'enchères placées sous la responsabilité du Bureau de Mise en Marché des Bois (BMMB), accessible à toute personne ou entreprise. Environ 75 % sont alloués aux détenteurs d'une Garantie d'Approvisionnement (GA) dans les 13 régions d'attribution (www.budget.finances.gouv.qc.ca). La GA confère à son bénéficiaire, un droit d'acheter annuellement un volume prédéterminé de bois en vue d'approvisionner son usine de transformation pour une période déterminée. Les volumes garantis correspondent aux besoins des usines, desquels il faut déduire la possibilité de s'approvisionner à partir d'autres sources, telles que les bois des forêts privées. Actuellement, la GA est offerte aux entreprises pour une période de cinq ans et pourra être renouvelée tous les cinq ans, à moins que le bénéficiaire n'ait pas respecté les obligations qui lui incombent. Parmi le volume de bois qui leur est garanti, les bénéficiaires d'une GA doivent déterminer le volume qu'ils s'engagent à acheter. La GA indique les volumes annuels de bois, par essence ou groupe d'essences, qui peuvent être achetés annuellement par le bénéficiaire, en provenance de chacune des régions visées par la garantie.

Le Service Canadien des Forêts (SCF) sert d'expert du gouvernement fédéral auprès des collectivités forestières. Le SCF s'efforce d'évaluer les incidences économiques, sociales et environnementales des changements survenant dans le secteur forestier.

1.3.2 Entreprises forestières

Les entreprises forestières et autres acteurs du secteur forestier peuvent se voir attribuer un contrat d'approvisionnement de 25 ans, renouvelable tous les cinq ans, qui leur garantit un volume de bois par année. Ce volume est divisé en catégories : par essence et par qualité de bois. Ces contrats sont obligatoires pour la coupe de bois dans les forêts publiques du Canada, et sont délivrés par le gouvernement provincial ou territorial qui a compétence sur les terres.

Chaque année, ces entreprises doivent dresser des plans d'aménagement forestiers qui respectent les lois forestières, les principes de l'aménagement forestier durable et la stratégie opérationnelle, dont plus de détails dans la section *1.4 Processus de planification*.

1.3.3 Autres parties prenantes

Des organismes indépendants évaluent les opérations d'exploitations forestières en fonction des normes d'aménagement forestier durable. Ces normes sont révisées régulièrement afin de correspondre aux attentes relatives à ce que constitue l'aménagement durable. Ces normes ont un impact sur le choix des traitements sylvicoles lors du processus de planification de la gestion des ressources forestières.

Environ 80 % des peuples autochtones vivent à l'intérieur ou à proximité des zones forestières. C'est pourquoi ils sont depuis longtemps impliqués dans l'industrie forestière qui est devenue l'un des secteurs commerciaux les plus importants de l'économie des Autochtones. Conformément aux accords passés avec le gouvernement, des représentants des peuples autochtones sont consultés lors de la planification de la gestion des ressources forestières.

1.4 Processus de planification

Au vu de la complexité de gestion de cet ensemble forestier, il y a quatre niveaux dans le processus de planification des ressources forestières : 1) planification stratégique, 2) planification tactique, 3) planification opérationnelle et 4) la programmation annuelle (Figure 1.1). Dans tous les cas, les gouvernements doivent approuver les plans de gestion forestière des entreprises et émettre les autorisations de récolte avant que tout arbre soit abattu.

Dans la province du Québec, le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) détermine le niveau stratégique en donnant le volume de bois commercialisable par zones, tout en tenant compte de la possibilité forestière et en accordant des contrats d'approvisionnement aux entreprises du secteur. Au niveau tactique, la sélection des chantiers et l'allocation des bois

aux usines se font par zones. Cette planification se fait sur un horizon glissant de cinq ans. Pour atteindre l'objectif déterminé au niveau stratégique, cela entraîne de prendre en compte les contraintes liées à la dispersion spatiale, aux demandes, aux capacités et aux performances des usines, et aux contraintes géographiques.

Le Bureau du forestier en chef (BFEC), indépendant du MFFP, détermine les possibilités forestières à rendement soutenu pour chacune des unités d'aménagement forestier. Ces plans sont élaborés sur la base de l'aménagement écosystémique qui consiste à assurer le maintien de la biodiversité et la variabilité des écosystèmes en diminuant les écarts entre la forêt aménagée et la forêt naturelle. Les possibilités forestières sont déterminées pour chaque unité d'aménagement sur un horizon de 150 ans ; le Québec est découpé en 70 unités d'aménagement. Le BFEC détermine également les traitements sylvicoles pour ces unités d'aménagement sur un horizon de 150 ans. Le BFEC et le MFFP communiquent et échangent des informations lors de cette étape pour avoir une vision globale réaliste (état des forêts, résultats des traitements sylvicoles passés, etc.).

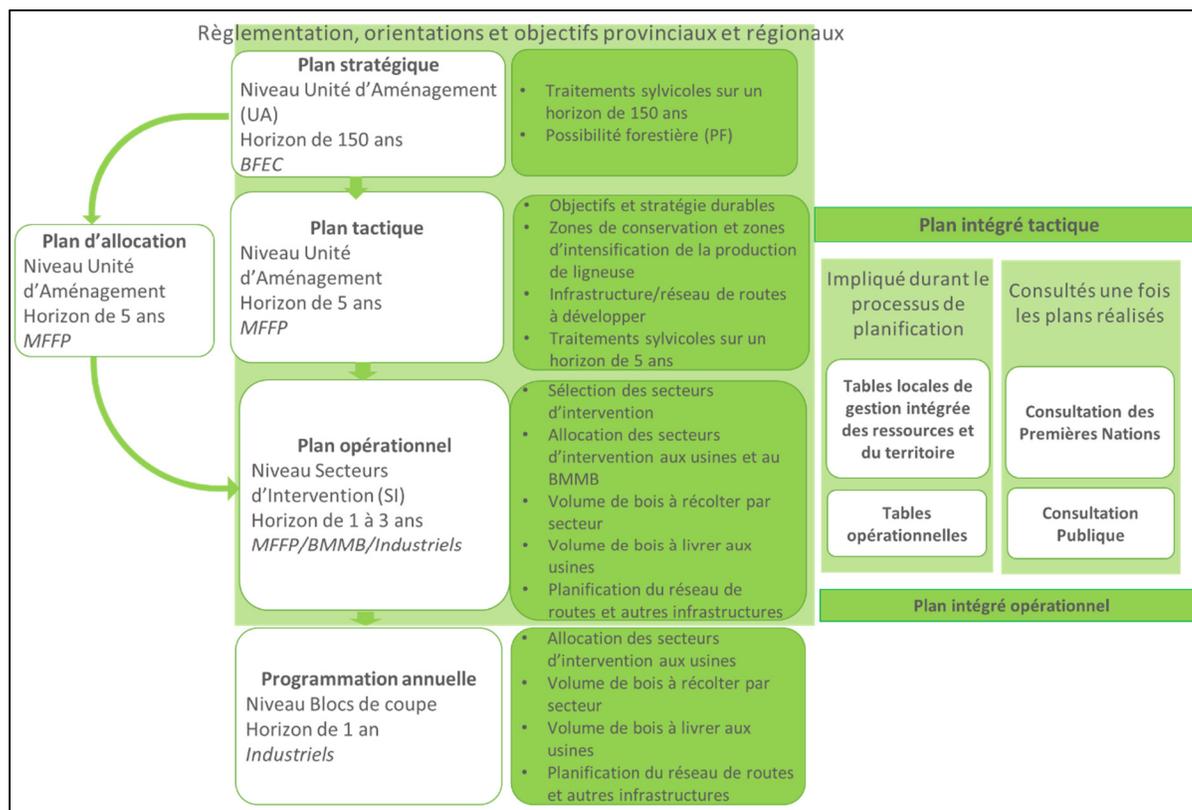


Figure 1-1 Processus de planification des ressources forestières au Québec

Adaptée de Boukherroub et al. (2017a)

Le MFFP est responsable de la réalisation des interventions forestières dont il confie les activités d'aménagement, telles que la récolte des bois, les travaux sylvicoles ou la construction d'infrastructure, à des entreprises d'aménagement ou à des détenteurs de garantie d'approvisionnement pour autant que ces exécuteurs obtiennent la certification reconnue. Le MFFP est également responsable des ventes de bois aux enchères et de l'attribution des droits forestiers, principalement des garanties d'approvisionnement destinées aux usines de transformation de bois.

Une fois les possibilités forestières et les traitements sylvicoles déterminés par le BFEC, le MFFP planifie sur un horizon de cinq ans les traitements sylvicoles, les objectifs et stratégies durables, les infrastructures et le réseau de routes à développer, ainsi que les zones d'intensification de la production de la fibre ligneuse pour chaque unité d'aménagement.

Ensuite, le MFFP planifie sur un horizon d'un à trois ans la sélection des secteurs d'intervention, l'allocation de ceux-ci aux usines et au BMMB, le volume de bois à récolter par ces dernières et celui à leur livrer, ainsi que la planification du réseau de routes et des autres infrastructures pour chaque chantier de coupe.

Par la suite, les industriels du secteur forestier définissent une programmation annuelle basée sur la planification opérationnelle du MFFP. La programmation annuelle définit l'allocation des secteurs d'intervention aux usines, le volume de bois à récolter par secteur et celui à livrer aux usines, ainsi que la planification du réseau de routes et des autres infrastructures.

1.5 Problématique

Lors de la définition des possibilités forestières, les volumes de bois pour une période sont estimés, ce qui entraîne un écart entre les volumes prévus et ceux réellement disponibles à la coupe. Chaque région est découpée en différentes zones de chantiers où le volume de bois disponible est défini précisément lors de la planification opérationnelle.

Les deux modèles étudiés dans ce mémoire sont un modèle d'allocation de volume de bois aux usines ayant une garantie d'approvisionnement par unité d'aménagement (niveau tactique), et un modèle de localisation des chantiers de coupe aux mêmes usines dans une unité d'aménagement (niveau opérationnel).

Le modèle d'allocation des ressources forestières détermine les unités d'aménagement et leur volume à allouer aux usines en prenant en compte les possibilités forestières par essence et par qualité de bois, ainsi que les contrats d'approvisionnement (Figure 1-2). Le modèle de localisation des chantiers de coupe détermine : 1) les volumes coupés par chantier de coupe, composés des volumes alloués aux usines et des volumes résiduels, 2) la liste des chantiers de coupe à ouvrir et 3) les résultats liés aux critères qui sont déterminés par les usines (Figure 1-3). Les extrants du modèle d'allocation des ressources deviennent les intrants du modèle de localisation des chantiers de coupe.

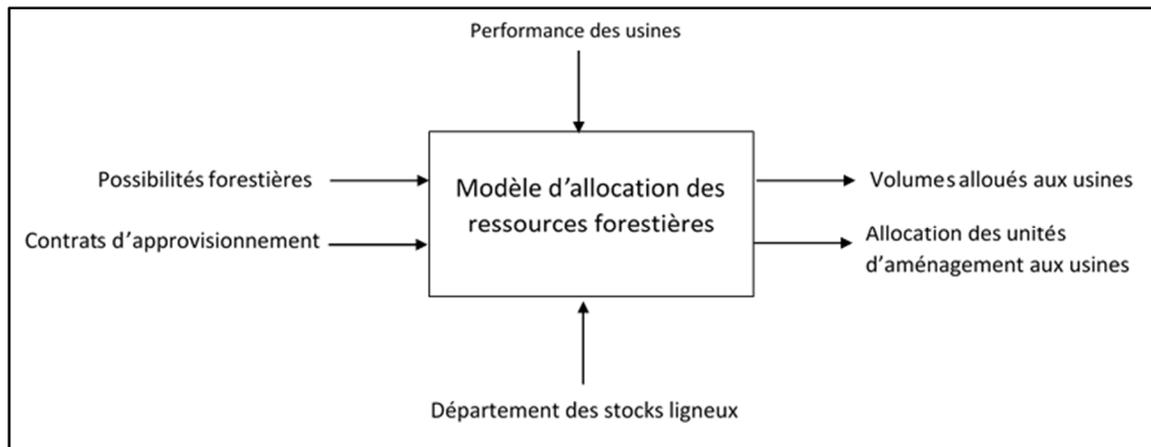


Figure 1-2 Représentation du processus d'allocation des ressources forestières

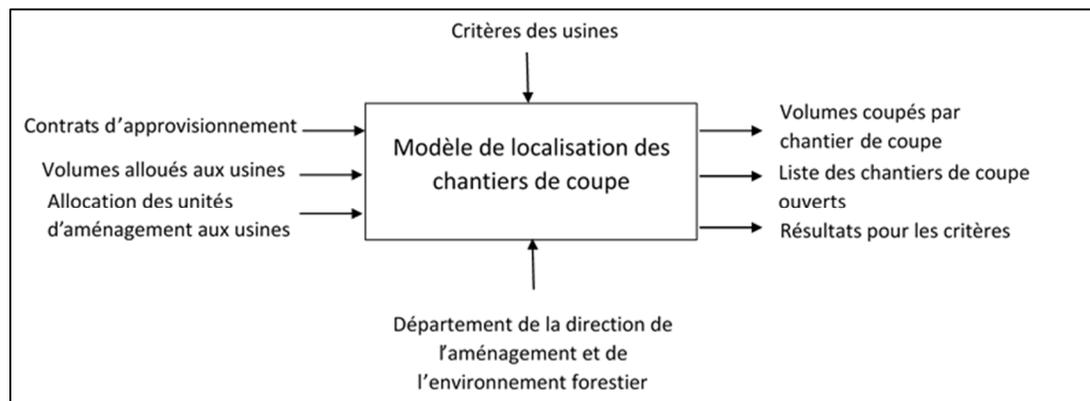


Figure 1-3 Représentation du processus de localisation des chantiers de coupe

Ces deux modèles que l'on souhaite intégrer dépendent de deux départements différents du MFFP : le département des stocks ligneux et le département de la direction de l'aménagement et de l'environnement forestier. Comme vu précédemment, les données pour le problème de localisation ne sont pas disponibles lorsque le modèle d'allocation est résolu. Une solution optimale du modèle d'allocation peut se révéler non réalisable lors de la résolution du modèle de localisation. Si tel est le cas, une nouvelle planification doit être décidée en urgence pour obtenir une solution réalisable du problème de localisation des chantiers de coupe. De plus, les décisions prises lors de l'allocation des ressources forestières peuvent amener à une solution sous-optimale pour le système complet. Entre la nécessité de replanifier l'allocation des ressources et l'obtention de solutions sous-optimales pour le système composé des deux

modèles, il est utile de travailler avec une méthode permettant l'intégration de plusieurs niveaux afin de réduire les écarts entre les solutions et d'aboutir à une modélisation plus proche du système global étudié.

Cette recherche a pour objectif de réaliser une intégration du modèle d'allocation et du modèle de localisation en utilisant une méthode avec fonction d'anticipation développée par Schneeweiss (2012). Cette méthode prend en considération une partie de la modélisation de la prise de décisions du niveau inférieur lors de la planification du niveau supérieur. Elle est davantage détaillée dans la section *2.5.3 Modèle d'anticipation de Schneeweiss*.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Les entreprises recherchent une stabilité et une pérennité économiques. Elles ont essayé de prévoir les demandes et les événements incertains pouvant perturber leurs activités. Pour les y aider, des chercheurs ont commencé à travailler sur des systèmes d'optimisation et de simulation de planification.

Ce chapitre définit ce qu'est tout d'abord le processus de planification en précisant les différents niveaux de planification et les limites engendrées par une résolution des problèmes niveau par niveau. Il détaille ensuite les différentes méthodes d'intégration de plusieurs niveaux de planification.

La suite du chapitre s'intéresse à la planification appliquée au domaine forestier. En effet, le secteur forestier est un domaine d'expertise vaste qui est confronté aux différents problèmes de planification. Le chapitre précise les processus d'intégration développés dans ce secteur. Il définit ensuite les problèmes de localisation et d'allocation qui sont à la base des activités forestières. Le chapitre se termine sur la présentation des modèles utilisés dans cette recherche : modèle d'allocation des ressources, modèle de localisation des chantiers de coupe, et méthode d'intégration de niveaux de planification par une fonction d'anticipation.

2.1 Processus de planification

La planification permet aux gestionnaires de gagner du temps et de l'argent sur leur projet. La planification a différents objectifs selon les entreprises. Ainsi, les gestionnaires peuvent organiser la production, le transport, la localisation des installations, l'allocation des ressources, etc. Dans le cas d'une entreprise manufacturière, la première étape à exécuter est la localisation des installations, aussi bien d'usines, d'entrepôts que d'équipements. Ensuite, l'allocation des ressources aux clients doit être effectuée en prenant en compte la planification de production et des transports. La planification de projet est utilisée à tout moment du cycle

de vie des produits, aussi bien dans le but d'apporter une amélioration, que dans le but de faire un suivi de fin de vie de ces produits par exemple. La planification permet l'anticipation, point majeur de tout projet. Elle doit être réalisée en amont de la date de lancement du projet, peu importe l'objectif de celui-ci. En effet, la planification prévoit les activités afin de réduire les erreurs, les coûts et le temps de travail.

Ces activités sont planifiées à plus ou moins long terme, la planification se fait donc sur plusieurs niveaux : stratégique pour le long terme, tactique pour le moyen terme et opérationnelle pour le court terme.

2.1.1 Définition des niveaux de planification

La définition de long, moyen ou court terme est relative au contexte dans lequel la planification est réalisée. Ainsi dans le domaine forestier, long terme définit un horizon de 150 ans, et court terme celui de cinq ou un an(s) selon le problème étudié. Cependant, chaque niveau a des objectifs différents détaillés dans les sections suivantes.

2.1.1.1 Planification stratégique

La planification stratégique oriente les actions de l'entreprise vers ses objectifs à long terme, tout en répondant aux exigences du marché et des parties prenantes. En général, cette planification permet de réaliser le schéma directeur de l'entreprise et de donner une vision globale de ce qu'elle veut devenir. En particulier, les problèmes de conception de réseaux font partie du schéma directeur et sont donc étudiés lors de la planification stratégique. Ceux-ci doivent être prévus de longue date, car il faut être sûr d'obtenir les financements nécessaires pour le début du projet et vérifier la viabilité de ces investissements à long terme. Ces derniers dépendent des stratégies de l'entreprise : par exemple l'équipement choisi pour une production sur stock sera différent d'une production sur commande. Un résumé des modèles stratégiques de conception de la chaîne logistique est présenté dans l'article de Vidal & Goetschalckx (1997). Les auteurs ont identifié un manque de modèles prenant en compte des paramètres incertains. Par exemple, le modèle de Arntzen, Brown, Harrison, & Trafton (1995) propose un

programme linéaire mixte permettant de trouver des stratégies de production et de distribution qui considèrent le problème d'internationalisation du marché, mais ce modèle reste déterministe.

2.1.1.2 Planification tactique

La planification tactique permet de prévoir les moyens à mettre en œuvre sur le moyen terme pour atteindre les objectifs fixés par la planification stratégique. Souvent en entreprise, la planification tactique détermine les quantités à produire en trouvant un équilibre entre le taux de satisfaction client et les différents coûts logistiques (production, stockage, etc.). Les problèmes de gestion de stocks sont d'un niveau de planification tactique. Pour résoudre ces problèmes, il faut minimiser les coûts, ce qui signifie qu'il faut minimiser le niveau de stocks. Cependant il faut également éviter les pénuries afin de respecter la demande prévue. Un des problèmes de stockage le plus étudié est celui de la détermination de la taille de lot à commander pour éviter du sur-stockage (Baker, 1989; Brahimi, Dauzere-Peres, Najid, & Nordli, 2006; Silver & Meal, 1973). Des entreprises ont également entrepris de diminuer leurs inventaires en automatisant les procédures de détermination des niveaux de stocks (Gorman & Ahire, 2006; Zhang, Meiser, Liu, Bonner & Lin, 2014) ou en trouvant des politiques optimisées de production et de logistique (Ouhimmou et al., 2008).

2.1.1.3 Planification opérationnelle

La planification opérationnelle permet de réaliser les objectifs fixés sur un plus court terme, voire quotidiennement. Ce niveau de planification détaille les décisions tactiques, le plus souvent sur un horizon journalier ou de plusieurs heures. Cependant, dans le secteur forestier, la planification opérationnelle est réalisée sur un horizon d'un à trois ans.

L'ordonnancement de la production est du niveau opérationnel. Ceci permet de fabriquer les produits dans un ordre permettant de satisfaire la demande, sans pénuries, et en minimisant les coûts de mise en œuvre.

2.1.2 Interdépendance des niveaux de planification

Dans un contexte de planification hiérarchique, chaque niveau de planification contraint celui qui lui est immédiatement inférieur dans la hiérarchie (Figure 2.1).

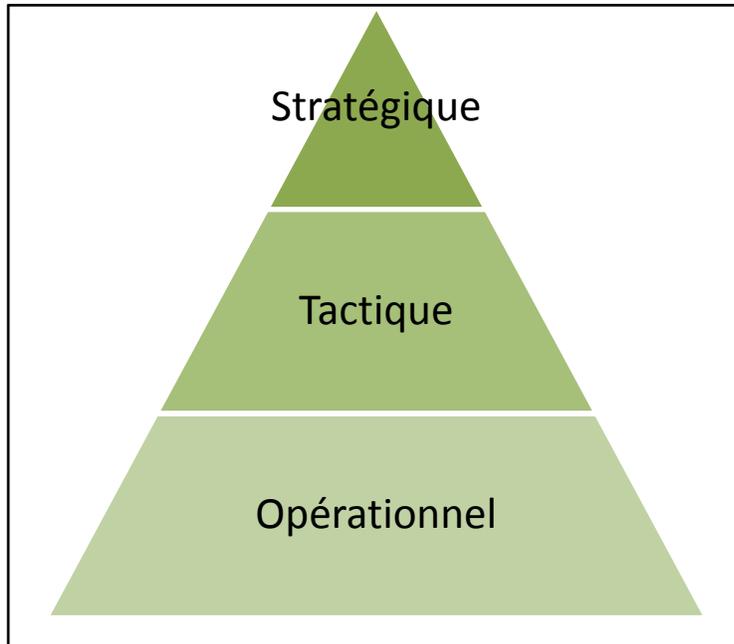


Figure 2-1 Pyramide hiérarchique des niveaux de planification

Lors d'une planification hiérarchique, les informations nécessaires aux différents niveaux de planification ne sont pas toutes disponibles aux mêmes instants. C'est pourquoi un niveau inférieur peut être infaisable ou incohérent par rapport aux décisions prises au niveau supérieur. Les problèmes de faisabilité peuvent apparaître en amont lorsque l'agrégation des informations est trop importante dans le niveau supérieur, ou lorsque des aléas sont apparus et changent le domaine des contraintes. Par exemple, dans le secteur forestier, les volumes de bois disponibles varient d'année en année selon l'occurrence d'incendies, d'infestations d'insectes (Zhu Chen, Ouhimmou, & Rönnqvist, 2016), de catastrophes naturelles ou selon la vitesse de croissance des arbres.

Afin de pallier les aléas dans la planification d'un niveau inférieur, les entreprises refont leur planification ou mettent en place une solution donnant le meilleur résultat possible. Les deux solutions reviennent à une augmentation des coûts du projet. Dans le premier cas, la planification du ou des niveaux supérieurs est de nouveau réalisée, par l'ajout d'une contrainte liée à l'infaisabilité détectée, puis les gestionnaires optimisent de nouveau la planification du niveau inférieur. Cependant, avec cette méthode, la planification du niveau inférieur peut de nouveau être infaisable ou incohérente si de nouveaux aléas apparaissent et qu'ils n'ont pas été pris en compte lors de la nouvelle planification des niveaux supérieurs. Cette première solution est, en plus d'être coûteuse en temps, coûteuse en argent. Dans le second cas, les décisions mises en place ne correspondront pas à la solution optimale et les coûts seront donc plus importants, et pouvant éventuellement générer d'autres problèmes.

2.1.3 Constat

Les solutions pour pallier aux aléas survenant suite à une planification ne sont pas idéales. Et comme précisé ci-dessus, elles sont coûteuses en argent et en temps. Pour limiter les conséquences des aléas, les entreprises ont établi des collaborations entre entreprises d'une même chaîne logistique ou entre les départements ou les usines d'une même entreprise. L'objectif de cette méthode est d'améliorer le résultat global de la chaîne logistique en modifiant uniquement les éléments les moins performants pour celle-ci. Cette méthode permet de sortir de la vision en silo que les entreprises ont mis en place lorsque les moyens de calculs n'étaient pas assez performants.

Ainsi, plusieurs chercheurs ont placé la collaboration des échelons d'une même chaîne logistique au cœur de leurs modèles. Par exemple, Dzupire & Nkansah-Gyekye (2014) ont développé un modèle bi-objectifs pour minimiser les coûts totaux de toute la chaîne logistique et pour minimiser le temps de livraison des produits des centres de distributions aux trois échelons de la chaîne logistique.

Cependant, la collaboration en elle-même n'est pas suffisante. Elle corrige les biais de prévisions liés à l'incertitude des demandes des autres échelons de la chaîne logistique. Mais elle ne corrige pas l'incertitude de la demande ou les aléas (catastrophes naturelles, pénurie de matières premières, variation des résultats précédents, etc.).

2.2 Méthodes d'intégration de plusieurs niveaux de planification

La collaboration entre entreprises n'étant pas suffisante, il faut trouver d'autres méthodes pour réduire les conséquences des incertitudes et aléas sur les différents niveaux de planification. Depuis les années 1990, les chercheurs ont développé des méthodes d'intégration de plusieurs niveaux de planification. Ces méthodes d'intégration sont des outils d'aide à la décision.

2.2.1 Différents types de divergences lors de la planification

Lors de la planification d'un niveau inférieur, telle que la planification tactique ou opérationnelle, des divergences apparaissent avec les objectifs obtenus lors de la planification du niveau supérieur. Andersson (2005) a détecté trois types de divergence entre la planification stratégique et tactique : 1) divergences spatiales, 2) divergences temporelles et 3) divergences liées aux niveaux des contraintes.

Les divergences spatiales sont dues à la prise en compte d'une zone géographique différente selon les niveaux de planification. Il est possible que le niveau supérieur ne prenne tout simplement pas en compte la spatialisation lors de sa résolution. C'est souvent le cas lors de la planification stratégique. Il est également possible d'avoir un niveau de détail différent : par exemple, dans le secteur forestier, la planification des niveaux stratégique et tactique se fait au niveau des unités d'aménagement qui contiennent plusieurs secteurs d'intervention qui sont pris en compte lors de la planification opérationnelle. Cette différence peut se retrouver dans les articles de Boukherroub et al. (2017b) et de Ouhimmou et al. (2015), travaillant respectivement au niveau des unités d'aménagement et des secteurs d'intervention.

Les divergences temporelles sont liées à la structure même d'une planification hiérarchique ; en effet les objectifs ne se font pas sur les mêmes horizons ni sur les mêmes périodes. Ainsi,

la planification opérationnelle se fait sur une portion de l'horizon de planification tactique, qui elle-même est réalisée sur une portion de l'horizon de planification stratégique. Dans le secteur forestier, les planifications stratégique, tactique et opérationnelle sont déterminées respectivement sur un horizon de 150 ans, de cinq ans et d'un à trois ans. Le niveau d'agrégation des données n'est donc pas le même selon l'horizon, et peut entraîner des biais entre les résultats des différents niveaux de planification.

Pour les divergences liées au niveau des contraintes, ce sont les types de contraintes nécessaires aux différents niveaux de planification qui sont différents. Par exemple, le niveau tactique peut posséder une contrainte sur la construction de nouvelles routes ou de l'entretien de celles existantes. Ces contraintes ne sont pas présentes lors de la planification stratégique. Ainsi, dans l'article de Jena, Cordeau, & Gendron (2015), la planification de coupe a déjà été réalisée et les auteurs étudient le problème de localisation des camps d'exploitation forestière. La planification de coupe a été réalisée sans les contraintes liées à la main-d'œuvre (nombre de logements, construction, relocalisation ou fermeture des camps, coûts de logement de la main d'œuvre, etc.).

Il est également possible d'obtenir des divergences provoquées par un mélange des trois causes exposées plus haut. Ainsi, dans le secteur forestier, l'état du système forestier diverge de l'état projeté du celui-ci. Pour Paradis, LeBel, D'Amours, & Bouchard (2013), ces divergences observées sont dues à mélange de causes telles qu'un problème de modélisation des liaisons entre les différents niveaux de planification (cycle de replanification entraîne des biais, objectifs alternatifs à trouver, etc.), ou telles que la construction même de la structure de la possibilité forestière. En effet, la possibilité forestière est déterminée sur un long horizon ; or, les données disponibles ne vont pas jusqu'au bout de cet horizon et il faut alors estimer les données nécessaires. Les auteurs ont créé un modèle itératif en deux étapes simulant l'interaction entre des processus de planification à long terme et à court terme. La modélisation est basée sur la théorie des jeux. Les modèles de planification à long terme et à court terme cherchent à maximiser les revenus des traitements sylvicoles appliqués à des zones de forêts, avec une désagrégation des données pour les modèles à court terme. Les auteurs ont réalisé

une étude de cas, avec deux types de modèles à court terme : un avec intégration des deux modèles et un sans intégration. Les résultats de l'étude de cas montrent que la méthodologie avec intégration des deux modèles permet de réduire les divergences observables.

Andersson (2005) identifie trois types d'approches développées pour diminuer ces différences : 1) les approches monolithiques, 2) les approches hiérarchiques (ou *top-down*) et 3) les approches *bottom-up*. Les approches hiérarchiques sont les plus étudiées ; en effet, les approches monolithiques nécessitent davantage de données et demandent plus de temps de calcul pour obtenir une solution. Les modèles créés avec ces approches sont plus gros, mais des divergences avec le système étudié persistent. Les approches *bottom-up* ne peuvent être utilisées que si le système étudié permet l'obtention des données pour la résolution du modèle du niveau inférieur au même instant que les données pour le niveau supérieur.

2.2.2 Approches hiérarchiques

Les approches hiérarchiques permettent de résoudre la planification du niveau supérieur puis celle du niveau inférieur, mais avec la possibilité de faire des itérations dans la résolution de ces planifications. Ainsi, après avoir résolu le modèle du niveau inférieur en prenant en compte les résultats du niveau supérieur, la planification du niveau supérieur est de nouveau résolue en prenant en compte, cette fois-ci, les résultats du niveau inférieur.

Plusieurs méthodes ont été développées pour intégrer deux niveaux de planification. L'objectif de ces méthodes reste le même : réussir à diminuer les divergences entre la planification des deux niveaux.

La planification intégrée des niveaux stratégique et opérationnel a été étudiée par Sabri & Beamon (2000) et Klibi & Martel (2013). Ces deux articles proposent des méthodes de conception du réseau de chaînes d'approvisionnement sous incertitudes. Le premier article propose une méthode d'analyse multi-objectifs pour étudier la performance d'un réseau de chaînes logistique. Les auteurs utilisent la méthode ϵ -constraint qui permet entre autres de

résoudre des modèles non linéaires et transformer un problème multi-objectifs en un problème uni-objectif. Les auteurs du second article ont généré des scénarios avec la méthode de Monte-Carlo, puis les ont résolus pour obtenir un ensemble de conceptions alternatives de réseau. Les auteurs utilisent ensuite une approche d'évaluation multicritères de conception pour sélectionner la solution la plus effective et robuste parmi toutes les solutions proposées à l'étape précédente.

La planification intégrée des niveaux stratégique et tactique a été étudiée par Andersson (2005), Bouchard, D'Amours, Rönnqvist, Azouzi & Gunn (2017), Fattahi, Mahootchi & Husseini (2015). Le dernier article étudie le problème de planification de la capacité lors de la conception du réseau de chaînes d'approvisionnement, ou SCND (*Supply Chain Network Design*). Les auteurs ont considéré les contraintes économiques, et plus particulièrement les demandes sensibles aux prix. L'objectif de cette méthode est de maximiser les profits d'un problème de localisation des installations, où la demande est dépendante des prix des produits. Le premier auteur présente une approche hiérarchique à deux niveaux pour le problème de planification intégrée dans le secteur forestier (Andersson, 2005). L'auteur met en avant les divergences spatiales rencontrées lors de la planification tactique. Les deux modèles de sa thèse mettent en avant les divergences spatiales et temporelles présentes dans la planification des ressources forestières. Le premier modèle présente les conséquences d'une agrégation temporelle pour la partie stratégique d'un modèle stratégique-tactique intégré. Le deuxième modèle présente une procédure en deux étapes avec un concept de pénalité qui permet de réduire le nombre de variables. Il est composé d'un modèle stratégique d'allocation et d'un modèle tactique pour les activités de récolte des bois. L'auteur a obtenu une diminution des divergences en utilisant ces deux modèles. Le second article présente également une méthode de planification intégrée des niveaux stratégique et tactique dans le secteur forestier. Les auteurs ont utilisé la méthode de génération de colonnes et ont décomposé le problème en sous-problèmes représentés par des hypergraphes. Les modèles utilisés sont basés sur les modèles des logiciels de gestion des ressources forestières. Le premier modèle est un modèle tactique du logiciel Logilab et le second modèle est un modèle stratégique du logiciel Silvilab. L'objectif du modèle tactique est de maximiser les gains associés aux procédés utilisés pour la

récolte du bois. L'objectif du modèle stratégique est de maximiser les revenus occasionnés par les traitements sylvicoles sur une zone.

La planification intégrée des niveaux tactique et opérationnel a été étudiée par Beaudoin et al. (2008). Ces auteurs ont étudié le problème de planification de la capacité de récolte du bois dans le secteur forestier. Ils ont intégré la planification tactique, composée des problèmes de récolte, de transport et de stockage, à la planification opérationnelle, composée entre autres des problèmes de séquençement et de transport des équipements et ceux d'allocation des produits. La méthode utilisée dans cet article est la méthode d'anticipation développée par Schneeweiss (2012).

2.2.3 Fonction d'anticipation de Schneeweiss

Schneeweiss (2012) utilise une fonction d'anticipation qui permet de devancer les décisions et les solutions du niveau inférieur lors de la prise de décisions du niveau supérieur. L'objectif de cette méthode est d'aider les gestionnaires à la prise de décisions. En réalisant l'optimisation pour différents scénarios, les gestionnaires sont à même de voir l'impact de leurs décisions et surtout de voir si leurs décisions ne vont pas entraîner de situation non réalisable pour le niveau inférieur. Dans le cas d'une planification hiérarchique, Schneeweiss a identifié plusieurs modèles de planification avec différents niveaux de planification : hiérarchie pure, anticipation non réactive, anticipation réactive, et modèle idéal (Schneeweiss, 2003). Lors de la planification hiérarchique pure, aucune transmission d'informations n'est réalisée. Il n'y a donc aucune anticipation. Dans le cas d'une planification avec une anticipation non réactive, seules des composantes du niveau inférieur sont prises en compte lors de la définition de la fonction objectif du niveau supérieur, contrairement à une planification avec une anticipation réactive où le niveau supérieur anticipe les réactions du niveau inférieur aux décisions possibles du niveau supérieur. Le cas du modèle idéal est le cas où la structure mathématique représente parfaitement le niveau inférieur lors de l'anticipation de celui-ci lors du niveau supérieur. Il n'y a aucune approximation lors du calcul de la fonction d'anticipation. Schneeweiss propose des exemples d'application dans l'industrie de production dans son livre

(Schneeweiss, 2012) et dans ses articles (Schneeweiss & Zimmer, 2004; Schneeweiss, 1995). Dans le second article (Schneeweiss, 1995), Schneeweiss propose un exemple de planification intégrée des niveaux tactique et opérationnel.

Le principe de cette méthode est de considérer le modèle mathématique simplifié, par exemple avec des quantités agrégées, du niveau inférieur lors de la planification du niveau supérieur (Figure 2.2). Dans cette figure, M décrit le modèle de planification, A représente le champ de décisions et C est la structure de préférence, soit le système de critères et contraintes. a^T symbolise les décisions du niveau supérieur. L'anticipation est représentée par le symbole « $\hat{\ }^B$ », lors du niveau inférieur anticipé.

Si l'on considère la planification niveau par niveau, les modèles mathématiques de planification du niveau supérieur et du niveau inférieur sont connus (respectivement M^T et M^B dans la Figure 2-2). Par conséquent, les gestionnaires du niveau supérieur peuvent aisément utiliser le modèle du niveau inférieur. La planification du niveau supérieur se faisant avant celle du niveau inférieur, beaucoup de données ne sont pas encore connues. C'est pourquoi les gestionnaires du niveau supérieur vont, soit agréger les données, soit les estimer. Une fois le modèle du niveau supérieur résolu, les gestionnaires vont simuler le modèle anticipé du niveau inférieur (\hat{M}^B dans la Figure 2-2) pour obtenir les résultats théoriques s'ils utilisent leurs décisions trouvées précédemment. Les résultats pour le modèle anticipé du niveau inférieur peuvent révéler une infaisabilité à ce niveau-ci. C'est pourquoi un nouveau scénario du niveau supérieur peut être modélisé puis résolu.

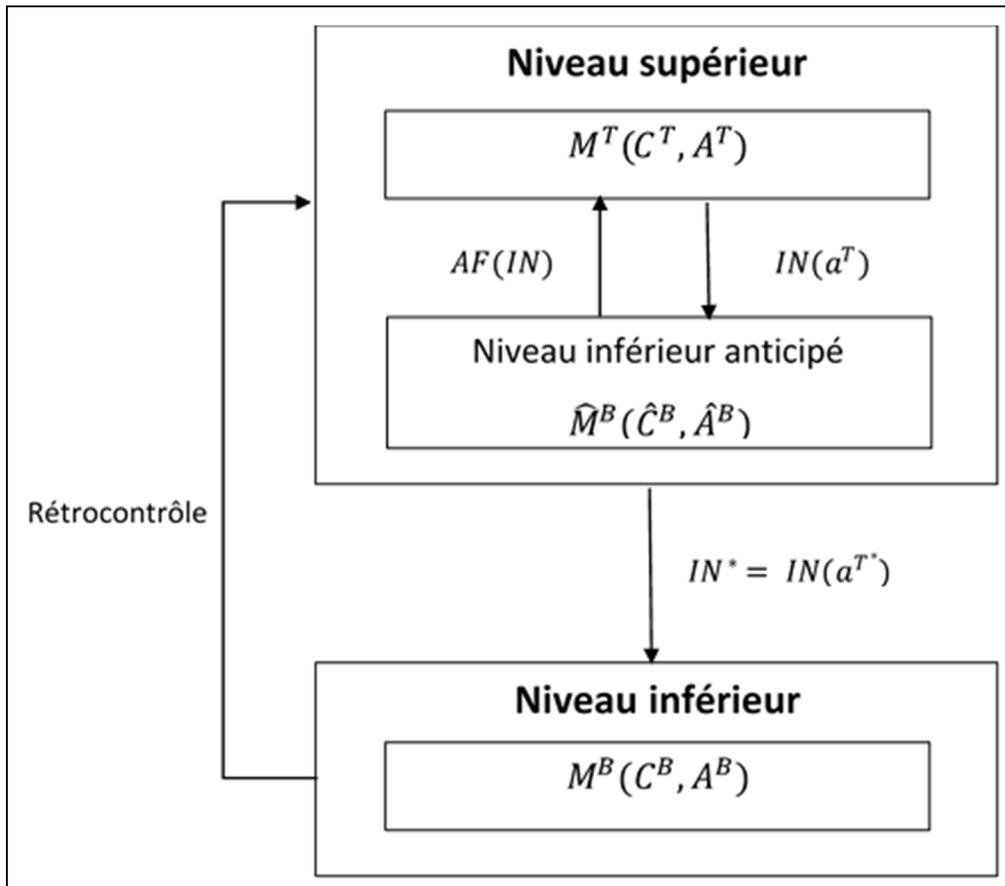


Figure 2-2 Structure d'un système de planification hiérarchique
Adapté de Schneeweiss (2012)

Lors de cette première étape, les gestionnaires du niveau supérieur peuvent décider quelles décisions ils vont prendre en anticipant les effets sur le niveau inférieur. Une fois ces décisions prises et transmises au niveau inférieur, les gestionnaires de celui-ci résolvent le modèle mathématique correspondant à leur problème de planification. Le niveau inférieur peut transmettre un *feedback* au niveau supérieur une fois leur planification effectuée. Ce rétrocontrôle a pour but d'améliorer l'anticipation du niveau inférieur par le niveau supérieur, et non de modifier la planification du niveau supérieur pour la période en cours.

Lors du développement du modèle mathématique du problème étudié, les gestionnaires doivent identifier les paramètres à estimer et les contraintes de couplage adéquates pour lier le modèle

du niveau supérieur et celui anticipé du niveau inférieur. Le modèle mathématique se décompose en deux parties : 1) une pour modéliser le niveau supérieur et 2) l'autre pour modéliser le niveau inférieur anticipé.

Plusieurs auteurs ont repris cette méthodologie pour réaliser une planification intégrée. Ainsi, Gfrerer & Zäpfel (1995) proposent une méthode générale de planification hiérarchique de la production avec une demande incertaine. Les deux niveaux de planification étudiés sont : 1) un niveau de production agrégé et 2) un niveau de production détaillé. Dans le secteur forestier, Beaudoin et al. (2008) ont repris la méthode de fonction d'anticipation de Schneeweiss pour intégrer la planification tactique et opérationnelle pour la capacité de récolte.

2.3 Planification dans le secteur forestier

Plusieurs problèmes de planification sont présents dans la planification de la gestion des ressources naturelles, et plus particulièrement pour les ressources forestières. Le secteur forestier est un secteur économique important dans certains pays, comme le Canada, le Chili ou encore la Suède. Les principes de gestion des ressources forestières sont similaires dans ces pays, mais certaines contraintes diffèrent selon les pays. Cependant, même si ces différences se retrouvent dans les modèles mathématiques ou les programmes développés par les chercheurs, et plus précisément dans leur étude de cas, la méthodologie peut être applicable pour tous les pays nécessitant une planification des ressources forestières.

2.3.1 Processus de planification

Historiquement, dans le secteur forestier, les niveaux de planification se font de manière découplée. Chaque niveau de planification a des objectifs différents. Un résumé des différents problèmes de planification ainsi que des contraintes à prendre en compte pour le secteur forestier a été réalisé par D'Amours, Rönnqvist & Weintraub (2008). Les décisions à prendre lors de la planification stratégique vont des décisions sur les stratégies de gestion de la forêt, sur les traitements sylvicoles, sur la construction de routes, sur l'ouverture ou la fermeture d'usines, aux décisions financières comme l'investissement dans de nouveaux équipements ou

le développement de produits et marchés. Les décisions tactiques changent si le problème est un problème de gestion forestière ou un problème de planification de la production ou de la distribution des produits forestiers. Les décisions prises à ces niveaux sont spatialisées. Les décisions opérationnelles reprennent les objectifs tactiques avec des contraintes plus détaillées : aussi bien temporelles que spatiales.

2.3.2 Intégration de plusieurs niveaux de planification

En réalisant une planification intégrée, il est possible de réduire les divergences, détaillées à la section 2.2.1, entre les niveaux de planification. Une première approche est la collaboration. Plusieurs chercheurs ont développé différentes méthodologies pour améliorer la collaboration dans une même chaîne d'approvisionnement. Un jeu en ligne permettant d'appréhender l'importance de la collaboration entre les différents échelons d'un système a été créé par Abasian, Rönnqvist, Marier, Gill-Couture, & Fjeld (2016). Ce jeu prend place dans le secteur forestier, et porte, plus précisément, sur un problème de transport : trouver les itinéraires, les retours des transports et la planification détaillée du transport. Les joueurs doivent prendre des décisions stratégiques puis tactiques. Des études de cas ont aussi été réalisées, comme les articles de Ouhimmou, D'Amours, Beaugerard, Ait-Kadi, & Chauhan (2008 ; 2009) et de Boukherroub, D'Amours, & Rönnqvist (2017a). Le premier article présente une méthode de planification tactique pour les activités de sciage, de séchage et de transport. Les auteurs ont créé une approche d'optimisation pour la coordination des opérations entre chaque échelon de la chaîne d'approvisionnement du bois. Le second article cherche à développer l'utilisation des théâtres de décisions lors de la planification forestière. Les théâtres de décisions permettent de créer un environnement de travail collaboratif pour mieux appréhender les contraintes des différentes parties prenantes du processus.

Cependant, la collaboration entre les échelons d'une chaîne logistique ne suffit pas à pallier aux divergences spatiales, temporelles, et celles liées aux types de contraintes. Les trois types de divergences peuvent être rencontrés lors de la planification des ressources forestières. C'est pourquoi des méthodes de planification intégrée ont été étudiées dans le secteur forestier.

Un modèle de planification intégrée des niveaux stratégique et tactique qui renforce les modèles des logiciels de planification existants (Logilab pour la planification tactique et Silvilab pour la planification stratégique) a été présenté par Bouchard et al. (2017). Les auteurs ont utilisé une méthode de génération de colonnes avec des sous-problèmes exprimés en hypergraphes. Les auteurs ont constaté une augmentation du profit de 13 % avec l'approche intégrée, comparée à la solution trouvée avec l'approche non intégrée.

Une méthode de planification intégrée des niveaux tactique et opérationnel a été développée par Beaudoin et al. (2008). Le problème étudié est celui de la planification de la capacité de récolte. Les auteurs utilisent l'approche de la fonction d'anticipation de Schneeweiss pour déterminer la faisabilité opérationnelle de la planification tactique. Les auteurs considèrent que dans un contexte de planification hiérarchique avec anticipation, l'approche avec anticipation doit être considérée comme un processus de collecte d'information, permettant d'aider les gestionnaires à comprendre l'impact de leur décision sur le niveau inférieur, plutôt que d'être considérée comme un problème d'optimisation.

2.4 Problèmes de localisation et d'allocation

Lors des décisions de planification, deux problèmes sont récurrents : 1) les problèmes de localisation des infrastructures ou des équipements et 2) les problèmes d'allocation des ressources. Ces deux problèmes sont liés, en effet pour réaliser l'allocation des ressources, il faut connaître l'emplacement « source » et l'emplacement « client ».

2.4.1 Problèmes de localisation

Pour minimiser les coûts, le plus souvent de transport, les entreprises et les gouvernements cherchent des méthodes leur donnant les meilleurs emplacements pour leurs usines, leurs entrepôts ou tout autre site. Les gestionnaires considèrent les emplacements comme meilleurs lorsque, à la fois les coûts fixes et variables sont les plus faibles et que la satisfaction client est

haute. Il existe plusieurs méthodes d'optimisation pour identifier les meilleurs emplacements : modèles analytiques, modèles continus, modèles en réseau et modèles discrets (Daskin, 2008).

Les modèles analytiques assument que la demande suit un type de distribution dans une zone de service et l'emplacement optimal peut être situé n'importe où sur cette zone. Les modèles continus considèrent que la demande émerge seulement à des points discrets. Les modèles en réseau partent du principe que la demande émerge uniquement sur un réseau composé de nœuds et d'arcs, ainsi que l'emplacement des installations. Les modèles discrets sont les modèles les plus étudiés, car ils trouvent la solution optimale sur un ensemble d'emplacements à considérer. Daskin (2008) met l'accent sur les modèles discrets et en présente plusieurs méthodes avec des exemples : *set covering*, *max covering*, *p-median*, etc.

On peut retrouver des exemples de ces méthodes dans la littérature (Dekle, Lavieri, Martin, Emir-Farinas, & Francis, 2005 ; Jena et al., 2015). Dans l'article de Dekle et al. (2005), le comté de Floride a trouvé les emplacements de centres de secours à ouvrir lors de catastrophes au moyen d'une approche en deux étapes d'un modèle de *covering location*. Dans le secteur forestier, une entreprise a trouvé les emplacements optimaux pour ces travaux d'exploitation forestière avec extension du problème de *Capacitated Facility Location Problem*, ou CFLP (Jena et al., 2015). Les auteurs ont pris en compte la possibilité d'étendre ou de relocaliser les camps d'exploitation forestière existants.

Klibi, Martel, & Guitouni (2010) présentent un résumé des méthodes utilisées pour résoudre les problèmes de conception de la chaîne logistique, dont les problèmes de localisation et de capacité des installations. Deux des voies de développement pour de futurs travaux évoquées par les auteurs sont de développer des méthodes permettant une génération de scénarios et prenant en compte la création de valeur durable.

2.4.2 Problèmes d'allocation

Une fois les emplacements des sites trouvés, il faut décider d'allouer ceux-ci aux clients afin de satisfaire la demande et si possible avec la meilleure performance possible (coût, temps de livraison, etc.). Ainsi, l'entreprise BMW a optimisé l'allocation de ses produits à ses différents sites de production dans les années 2000 (Fleischmann, Ferber, & Henrich, 2006). Les auteurs ont créé un logiciel de planification pour optimiser l'allocation sur le réseau de la chaîne d'approvisionnement de BMW. Ce logiciel permet d'obtenir rapidement des planifications pour différents scénarios et aide ainsi les gestionnaires à prendre des décisions stratégiques.

Une méthode de localisation-allocation est présentée par Gelders, Pintelon, & Van Wassenhove (1987). Une brasserie cherchait à diminuer le nombre de ses entrepôts après une fusion de deux entreprises. Les chercheurs ont d'abord trouvé le nombre idéal d'entrepôts, puis ont trouvé leurs emplacements idéaux et les allocations des clients à ces entrepôts. Ils ont utilisé un modèle discret de localisation et ont validé leurs résultats avec un modèle continu de localisation utilisant un algorithme de centre de gravité et avec une analyse de sensibilité. Les deux modèles, discret et continu, ont donné sensiblement les mêmes emplacements pour les 17 sites à ouvrir.

2.4.3 Modèles utilisés dans cette recherche

Dans le secteur forestier, les problèmes de localisation et d'allocation ne se résolvent pas au même niveau de planification. Et contrairement à la plupart des problèmes étudiés dans d'autres secteurs, le problème de localisation (décisions opérationnelles) se résout réellement après le problème d'allocation (décisions tactiques). Ainsi, l'allocation des ressources aux usines (Boukherroub et al., 2017b) se fait en préalable de la localisation des secteurs d'intervention (Ouhimmou et al., 2015). Cependant les niveaux de spatialisation et temporels ne sont pas les mêmes pour les deux modèles : l'allocation se fait au niveau d'unités d'aménagement et sur un horizon de planification de cinq ans contrairement à la localisation qui est réalisée au niveau de secteurs d'intervention et sur un horizon d'un an. C'est pourquoi

une approche de planification intégrée est étudiée dans cette recherche. Les modèles du secteur forestier et la méthode de fonction d'anticipation présentés ci-après ont été utilisés.

2.4.3.1 Modèle d'allocation des ressources

Le modèle d'allocation des ressources aux usines utilisé dans cette recherche est basé sur les travaux de Boukherroub et al. (2017b). Ce modèle d'allocation cherche à distribuer équitablement les ressources forestières aux usines selon leurs performances propres. Celles-ci sont évaluées par des experts, des employés du MFFP, selon trois aspects : 1) économique, 2) environnemental et 3) social. Le premier expert est responsable de l'allocation du bois dans plusieurs régions du Québec, et le second est responsable pour l'estimation de la demande de bois des usines pour les forêts publiques. Ces travaux se composent de trois étapes : 1) la détermination de critères pour une allocation durable, 2) l'évaluation des performances des usines en prenant en compte chaque critère retenu, puis 3) l'allocation du bois aux usines selon leur performance. Ce modèle est destiné à être utilisé lors de la planification tactique du MFFP. Ce modèle a deux fonctions-objectifs : 1) la première permet de maximiser la création de valeur par les usines et 2) la seconde encourage l'équité entre les usines. Les auteurs de cette recherche ont réalisé une étude de cas au Québec qui a montré l'impact que pouvait avoir l'évaluation des usines selon des objectifs de développement durable sur les décisions d'allocation du bois, ainsi qu'une relation gagnante permettant de créer davantage de valeur grâce à la répartition plus équitable des ressources entre les usines.

2.4.3.2 Modèle de localisation des chantiers de coupe

Le modèle de localisation des chantiers de coupe utilisé dans cette recherche est basé sur les travaux de Ouhimmou et al. (2015). Ce modèle de localisation cherche à déterminer quels sont les chantiers de coupe à ouvrir dans une unité d'aménagement et d'allouer les volumes de bois de ces chantiers de coupe aux usines, tout en cherchant à minimiser la distance globale entre les chantiers de coupe ouverts. Les contraintes écrites dans ce modèle sont assez générales, ce qui permet au gestionnaire de choisir les critères qui vont être étudiés. Les chercheurs ont listé les critères suivants pouvant être utilisés : coût d'approvisionnement, distance entre les

différentes unités, coût de transport, accessibilité des chantiers de coupe l'hiver, volume par tige, budget pour les traitements sylvicoles, pourcentage de certification et dispersion spatiale. Ce modèle est utilisé lors de la planification opérationnelle du MFFP. Cependant pour utiliser ce modèle, il faut déjà posséder les éléments d'allocation des ressources aux usines, par exemple par le modèle de Boukherroub et al. (2017b). Le modèle d'allocation des ressources aux usines appartient au niveau supérieur de planification et le modèle de localisation des chantiers de coupe au niveau inférieur.

2.5 Conclusion

À présent que la modélisation des objectifs de planification niveau par niveau est largement documentée, les chercheurs se penchent sur les méthodes d'intégration de plusieurs objectifs de planification. Les méthodes d'intégration doivent pallier aux divergences existantes dans les méthodes de planification utilisées actuellement. Ces divergences peuvent être d'ordre spatial, temporel ou liées aux contraintes des modèles.

Trois approches ont été identifiées par Andersson (2005) pour diminuer ces divergences : les approches monolithiques, les approches *bottom-up* et les approches hiérarchiques. Les deux premières approches ont comme inconvénient d'avoir besoin des données précises sur le niveau inférieur dès la première itération du modèle pour sa résolution. Les approches hiérarchiques permettent de résoudre les niveaux de planification l'un après l'autre et autorisent les itérations dans leur résolution. Le temps de résolution est réduit par rapport à une approche de type monolithique.

La méthode avec fonction d'anticipation de Schneeweiss (2012) est une approche de type hiérarchique. Elle permet d'anticiper la réaction du niveau inférieur aux décisions du niveau supérieur. Cette méthode est intéressante à développer, car le niveau supérieur peut analyser seul l'impact de ses décisions sur le niveau inférieur en anticipant le modèle de celui-ci. Et par conséquent, il peut vérifier si ses décisions débouchent sur une solution réalisable, ou non, pour la planification au niveau inférieur. Les données des deux modèles sont agrégées et

désagrégées, ce qui peut entraîner des biais dans les solutions. Il faut donc porter une attention particulière lors de l'agrégation des données.

La planification dans le secteur forestier se fait de manière découplée et des biais importants apparaissent entre les différents niveaux de planification. Plusieurs approches ont été étudiées : la collaboration entre les échelons d'une chaîne logistique, une méthode de génération de colonnes pour une planification intégrée, ou encore une méthode de planification intégrée avec fonction d'anticipation. La collaboration entre différentes parties est coûteuse en temps et en échange de données. Des problèmes humains peuvent également intervenir dans ce genre d'approche. La méthode de planification intégrée avec fonction d'anticipation permet, quant à elle, de limiter les échanges entre les différents niveaux à une validation de la modélisation du niveau inférieur anticipé et des lois de distributions des paramètres.

Parmi les problèmes les plus étudiés, les problèmes d'allocation et localisation sont largement représentés, ainsi que les problèmes de localisation-allocation. Cependant, dans le secteur forestier, l'allocation des ressources forestières se fait avant la localisation des chantiers de coupe. Or la modélisation d'un problème d'allocation-localisation ne semble pas avoir été étudiée, puisque la plupart des processus de planification sont modélisés au mieux par un problème de localisation-allocation. Ce problème d'allocation-localisation est étudié dans ce mémoire avec une étude de cas dans le secteur forestier et en utilisant une méthode de planification intégrée.

Dans cette recherche, le modèle d'anticipation de Schneeweiss va être appliqué pour un cas dans le secteur forestier. Les modèles de Boukherroun et al. (2017) et de Ouhimmou et al. (2015) seront utilisés, respectivement, en tant que modèle pour le niveau supérieur et le niveau inférieur.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

3.1 Introduction

La méthodologie présentée dans ce chapitre est une modélisation du problème d'intégration des modèles d'allocation des ressources et de localisation des chantiers de coupe. Ce chapitre présente dans un premier temps les nouvelles hypothèses de travail, car les hypothèses de recherche des deux modèles du secteur forestier rendent complexe l'intégration des deux niveaux de planification suivants : tactique et opérationnel. Dans un second temps, la formulation du modèle mathématique linéaire mixte en nombres entiers est détaillée. Le modèle d'intégration des deux niveaux de planification se fait en deux étapes : 1) d'abord la planification de l'allocation des ressources forestières aux entreprises, puis 2) la planification de la localisation des chantiers à ouvrir pour chaque période.

3.2 Hypothèses de travail

Par souci de simplification, les hypothèses de travail des articles de Boukherroub et al. (2017b) et de Ouhimmou et al. (2015) n'ont pas toutes été prises en compte. Le principal obstacle rencontré pour effectuer une étude de cas plus approfondie a été le manque de temps pour réaliser une collecte de données complète et précise dans la durée impartie d'une maîtrise.

L'évaluation des performances des usines reste fastidieuse et difficilement objective. En effet, les chercheurs ont eu recours à des experts dans le secteur forestier afin d'évaluer les performances selon les trois aspects : économique, environnemental et social. Actuellement, le score de performance n'a pas été déterminé pour un nombre significatif d'usines. Cependant, il est plus aisé dans un premier temps de mettre en place une évaluation de la performance des usines pour l'aspect économique. Ainsi le score de performance attribué à chaque usine dans l'article de Boukherroub et al. (2017b) est devenu dans cette recherche le score économique attribué à chaque usine, c'est-à-dire que les aspects environnementaux et sociaux n'ont pas été

pris en compte dans cette recherche. L'étude de cas réalisée dans ce mémoire n'a pas été basée sur des données historiques, par conséquent la différenciation entre les scieries et les usines de pâtes et papiers n'est pas établie dans cette recherche, ce qui implique que les contraintes de proportion des volumes de bois à allouer aux différentes usines n'ont pas été non plus considérées. Une seule fonction-objectif a été prise en compte : celle qui permet d'allouer les volumes de bois de façon à maximiser les volumes de bois attribués aux usines ayant la meilleure performance. Cette fonction-objectif est celle qui correspond le mieux à l'objectif final de la méthode de planification intégrée développée dans ce mémoire. En effet, la seconde fonction-objectif de l'article de Boukherroub et al. (2017b) sert à allouer les volumes de bois proportionnellement à la performance des usines, afin de réaliser une allocation plus équitable. Or, n'ayant pas de données sur les scores de performances des usines, ceux-ci sont uniquement basés sur la performance économique et à des fins de simplification, ils sont égaux dans l'étude de cas détaillée au chapitre 4.

Dans l'article de Ouhimmou et al. (2015), le choix des critères est laissé au gestionnaire qui utilisera le modèle d'optimisation. Pour cette recherche, un seul critère a été considéré : le coût d'approvisionnement. Ce choix a été influencé par la forte présence de ce critère dans les articles de recherche dans tous les domaines. Il est donc plus aisé d'obtenir des données sur un critère fortement répandu comme le coût d'approvisionnement. Dans cet article, on trouve deux fonctions-objectifs. Cependant l'aspect d'optimisation de la spatialisation des chantiers de coupe à ouvrir n'a pas été pris en compte dans cette recherche. Cette simplification a été réalisée due au manque de temps pour réaliser une collecte de données complète. Seule la fonction-objectif permettant de minimiser la différence entre les valeurs cibles et les valeurs réelles des critères a été considérée.

Pour réaliser l'intégration de ces deux niveaux de planification, la méthode de Schneeweiss (2012) a été utilisée. Plusieurs scénarios peuvent être créés afin d'aider le gestionnaire à choisir la solution ayant la meilleure probabilité de faisabilité opérationnelle et de robustesse. Les scénarios peuvent être connus avant le lancement de l'optimisation (cas pessimiste, cas optimiste, etc.) ou peuvent découler des résultats obtenus lors de la première itération sur le

modèle d'allocation puis sur le modèle de localisation (intégrer des résultats comme contraintes dans le modèle).

La période du modèle d'allocation des ressources aux usines est de cinq ans, ce qui correspond également à son horizon de planification, tandis que celle du modèle de localisation des chantiers de coupe est d'un an sur un horizon de cinq ans.

3.3 Modèle de planification intégrée

Le modèle mathématique développé ci-dessous intègre le modèle d'allocation des ressources aux usines avec le modèle de localisation des chantiers de coupe en utilisant la méthode d'anticipation de Schneeweiss (2012). Le modèle mathématique est composé de deux parties : une pour l'allocation des ressources aux usines, et l'autre pour la localisation des chantiers de coupe.

3.3.1 Ensembles et indices

Les ensembles suivants sont utilisés dans les deux parties du modèle. Les chantiers de coupe sont regroupés selon l'unité d'aménagement auxquels ils appartiennent. Il en est de même pour les qualités de bois qui sont regroupés selon les essences auxquelles ils appartiennent. Cependant un chantier de coupe ne peut appartenir qu'à une seule unité d'aménagement, tandis qu'une qualité de bois peut appartenir à plusieurs essences.

$m \in M$	Ensemble des usines
$u \in U$	Ensemble des unités d'aménagement
$a \in A_{(u)}$	Ensemble des chantiers de coupe appartenant à l'unité d'aménagement u
$e \in E$	Ensemble des essences de bois
$q \in Q$	Ensemble des produits de qualité q
$q \in Q_{(e)}$	Ensemble des produits de qualité q appartenant à l'essence e
$c \in C$	Ensemble des critères à considérer dans la fonction-objectif

$p \in P$ Ensemble des périodes de planification de localisation p sur l'horizon P (cinq périodes de un an)

3.3.2 Modèle d'allocation des ressources aux usines

L'allocation des ressources se fait lors de la planification tactique au début de la période de 5 ans. Pour chaque année, le MFFP doit déterminer le volume à allouer aux entreprises ayant un contrat d'approvisionnement avec le ministère. Ce contrat détermine le volume annuel minimal et le volume annuel théorique à allouer à une entreprise pour chaque essence et qualité de bois. Ce premier modèle est basé sur celui de Boukherroub et al. (2017b). Seules les considérations économiques du modèle de base ont été prises en compte dans cette étude.

3.3.2.1 Paramètres

Les paramètres suivants ont été utilisés pour le modèle d'allocation des ressources aux usines. La possibilité annuelle de coupe ainsi que la capacité annuelle de production d'une usine doivent être supérieures au volume minimum à allouer à cette usine. Le score de performance de Boukherroub et al. (2017b) est défini ici uniquement par sa composante économique. Ce score est compris entre 0 et 1.

a_{qu} Possibilité de coupe pour une période de cinq ans pour les produits d'essence e et de qualité q de l'unité d'aménagement u

c_{em} Capacité de production pour une période de cinq ans de l'usine m pour les produits d'essence e

v_{qm} Volume minimum de produits de qualité q qui doit être alloué à l'usine m pour une période de cinq ans

s_{em} Score économique, valeur économique des produits d'essence e pour l'usine m

3.3.2.2 Variables de décisions

Les variables de décisions de ce modèle sont les quantités de produits de qualité et d'essence de bois allouées aux usines.

X_{qmu}	Quantité de produits de qualité q allouée à l'usine m venant de l'unité d'aménagement u
Z_{emu}	Quantité des essences de bois e allouée à l'usine m venant de l'unité d'aménagement u

3.3.2.3 Fonction-objectif

Dans le modèle d'allocation, la somme des volumes alloués aux usines pondérés par leur score est à maximiser. Cette fonction-objectif permet d'allouer le bois aux usines proportionnellement à leur performance, l'objectif étant de satisfaire la demande des usines ayant des scores les plus forts.

$$\text{Max } f_1 = \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} (s_{em} * \sum_{u \in U} Z_{emu}) \quad (3.1)$$

3.3.2.4 Contraintes

Plusieurs contraintes sont à respecter pour l'allocation des ressources. Étant donné qu'il y a deux variables pour définir les volumes de bois, la contrainte (3.2) permet de les lier pour faire correspondre les quantités de produits allouées aux usines. Ces quantités doivent respecter la possibilité annuelle de coupe (3.3) et les contrats d'approvisionnement (3.5), et ne doivent pas excéder les capacités des usines (3.4). Les variables de décisions doivent être positives (3.6).

$$Z_{emu} = \sum_{q \in Q_{(e)}} X_{qmu} \quad \forall e \in E, \forall m \in M, \forall u \in U \quad (3.2)$$

$$\sum_{m \in M} X_{qmu} \leq a_{qu} \quad \forall q \in Q_{(e)}, \forall u \in U \quad (3.3)$$

$$\sum_{u \in U} Z_{emu} \leq c_{em} \quad \forall e \in E, \forall m \in M \quad (3.4)$$

$$\sum_{u \in U} X_{qmu} \geq v_{qm} \quad \forall q \in Q, \forall m \in M \quad (3.5)$$

$$X_{qmu}, Z_{emu} \geq 0 \quad \forall q \in Q, \forall e \in E, \forall m \in M, \forall u \in U \quad (3.6)$$

3.3.3 Modèle de localisation des chantiers de coupe

Une fois l'allocation des ressources réalisées, le MFFP détermine quel chantier ouvrir pour la récolte. Les chantiers de coupe ouverts doivent pouvoir fournir les quantités de bois allouées aux usines. Pour ce modèle, il est nécessaire de connaître les volumes alloués à chaque entreprise du modèle précédent. Ce deuxième modèle est basé sur le modèle de Ouhimmou et al. (2015). Toutefois, la contrainte de répartition spatiale n'a pas été prise en compte dans cette étude à des fins de simplification lors de l'intégration des deux niveaux de planification.

Cette partie du modèle d'intégration est anticipée, c'est-à-dire que certains paramètres ne sont pas encore connus avec certitude lors de l'optimisation. Ces paramètres sont estimés, que ce soit au moyen de données historiques ou d'une courbe de tendance. Le résultat obtenu permet de trouver une solution optimisée pour un scénario donné, qui cherche à être le plus proche de la réalité.

3.3.3.1 Paramètres

Les paramètres estimés sont le volume disponible de bois pour chaque chantier de coupe ainsi que la valeur moyenne des critères pour chaque chantier de coupe. Ces paramètres sont dits anticipés, car leur valeur cherche à anticiper le résultat réel. Les valeurs des variables de décisions pour les quantités à allouer aux usines du modèle précédent deviennent un paramètre, puisqu'il faut respecter ces quantités à allouer dans le choix des chantiers de coupe à ouvrir. La capacité annuelle de production et le volume minimum à allouer de chaque usine sont les mêmes paramètres que pour le modèle d'allocation des ressources aux usines. Une valeur cible

pour chaque critère a également été étudiée. Ces valeurs cibles sont définies par les usines clientes.

\widehat{w}_{aeqp}	Volume disponible anticipé de bois d'essence e et de qualité q disponible à la coupe dans le chantier de coupe a (m^3) pour la période p
\widehat{b}_{ca}	Valeur moyenne anticipée du critère c pour le chantier de coupe a (ha)
c_{em}	Capacité de production pour une période de cinq ans de l'usine m pour les produits d'essence e
v_{qm}	Volume minimum de produits de qualité q qui doit être alloué à l'usine m pour une période de cinq ans
t_{cm}	Cible à atteindre pour chaque critère c pour l'usine m
X_{qmu}^*	Solution du modèle précédent pour la quantité de produits de qualité q allouée à l'usine m venant de l'unité d'aménagement u
Z_{emu}^*	Solution du modèle précédent pour la quantité des essences de bois e allouée à l'usine m venant de l'unité d'aménagement u

3.3.3.2 Variables de décisions

Les variables de décisions du modèle de localisation sont les variables d'écart pour chaque critère entre sa valeur réelle et sa valeur cible, une variable binaire représentant si un chantier de coupe est ouvert ou non lors d'une période, les volumes résiduels pour chaque chantier de coupe et les flux totaux de bois entre chaque chantier de coupe et chaque usine. Les volumes disponibles pour chaque chantier de coupe sont composés des volumes de bois coupés et envoyés aux usines, représentés par les flux totaux de bois, plus les volumes de bois coupés et laissés sur place, représentés par les volumes résiduels.

F_{ameqp}	Flux total de bois de l'essence e et de qualité q (m^3) du chantier de coupe a vers l'usine m pour la période p
R_{aeqp}	Volume résiduel de bois de l'essence e et de qualité q (m^3) du chantier de coupe a pour la période p

Y_{ap}	Variable binaire, égale à 1 si le chantier de coupe a est choisi pour la production pour la période p , 0 sinon
S_{cpm}^+	Variable d'écart positive pour le critère c pour l'usine m pour la période p
S_{cpm}^-	Variable d'écart négative pour le critère c pour l'usine m pour la période p

3.3.3.3 Fonction-objectif

Dans le modèle de localisation, la somme des écarts, positifs et négatifs, de chaque critère est à minimiser. Les critères pouvant être pris en compte sont les suivants : coût d'ouverture des chantiers de coupe, coût d'achat des ressources, volume par tige, volume par hectare et coût de transport. Cette fonction-objectif permet de rester aux plus proches des valeurs cibles des usines pour chaque critère tout en les approvisionnant de la bonne quantité de bois.

$$\text{Min } f_2 = \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} (S_{cpm}^+ + S_{cpm}^-) \quad (3.7)$$

3.3.3.4 Contraintes

Pour optimiser la localisation des chantiers de coupe à ouvrir, il faut respecter les contraintes de capacité de ces chantiers (3.8) tout en respectant les contraintes de demandes minimales et maximales pour chaque usine cliente (3.9 et 3.10). Le volume résiduel est égal à la différence entre la somme des volumes de bois envoyés aux usines pour chaque essence et qualité de bois et la capacité des chantiers de coupe pour ces mêmes essences et qualités de bois. Chaque critère a des valeurs cibles définies par les différentes parties intéressées, la contrainte (3.11) permet de les respecter tout en définissant les variables d'écarts pour chaque critère. Un chantier de coupe ne peut être ouvert au maximum qu'une seule fois sur la période P (3.12). Les variables d'écart, de flux et de volume résiduel doivent être positives (3.13, 3.14 et 3.15) tandis que les variables d'ouverture des chantiers doivent être binaires (3.16).

$$\sum_{m \in M} F_{ameqp} = \hat{w}_{aeqp} \times Y_{ap} - R_{aeqp} \quad \forall a \in A_{(u)}, \forall e \in E, \forall q \in Q_{(e)}, \forall p \in P \quad (3.8)$$

$$v_{qm} \leq \sum_{a \in A_{(u)}} \sum_{p \in P} \sum_{e \in E} F_{ameqp} \quad \forall m \in M, \forall q \in Q_{(e)} \quad (3.9)$$

$$\sum_{a \in A_{(u)}} \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q_{(e)}} F_{ameqp} \leq c_{em} \quad \forall m \in M, \forall e \in E \quad (3.10)$$

$$\left(\sum_{a \in A_{(u)}} \sum_{e \in E} \sum_{q \in Q_{(e)}} (\hat{b}_{ca} \times Y_{ap} \times \hat{w}_{aeqp}) - (t_{cm} \times F_{ameqp}) \right) + S_{cpm}^+ - S_{cpm}^- = 0 \quad \forall c \in C, \forall m \in M, \forall p \in P \quad (3.11)$$

$$\sum_{p \in P} Y_{ap} \leq 1 \quad \forall a \in A \quad (3.12)$$

$$F_{ameqp} \geq 0 \quad \forall a \in A_{(u)}, \forall m \in M, \forall e \in E, \forall q \in Q_{(e)}, \forall p \in P \quad (3.13)$$

$$R_{aeqp} \geq 0 \quad \forall a \in A_{(u)}, \forall e \in E, \forall q \in Q_{(e)}, \forall p \in P \quad (3.14)$$

$$S_{cpm}^+, S_{cpm}^- \geq 0 \quad \forall c \in C, \forall p \in P, \forall m \in M \quad (3.15)$$

$$Y_{ap} \in \{0; 1\} \quad \forall a \in A_{(u)}, \forall p \in P \quad (3.16)$$

3.3.3.5 Contraintes de couplage

Afin de lier les deux modèles, il faut considérer les variables du premier modèle comme des paramètres pour le second modèle. Les quantités de bois d'essence e de qualité q coupées dans le chantier a allouées aux usines m doivent être égales à celles des produits de même qualité q allouées aux usines lors de la même période t (3.17); idem avec les quantités d'essence e et de qualité q allouées entre les chantiers de coupe a et les usines m et celles des produits de même essence e allouées aux usines lors de la même période t (3.18).

$$\sum_{a \in A_{(u)}} \sum_{q \in Q_{(e)}} \sum_{p \in P} F_{ameqp} = Z_{emu}^* \quad \forall m \in M, \forall e \in E, \forall u \in U \quad (3.17)$$

$$\sum_{a \in A_{(u)}} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} F_{ameqp} = X_{qmu}^* \quad \forall m \in M, \forall q \in Q_{(e)}, \forall u \in U \quad (3.18)$$

La solution obtenue donne l'ensemble des chantiers de coupe à ouvrir ainsi que les volumes de bois de chaque chantier de coupe à allouer aux usines de façon à minimiser les écarts des valeurs de critère pour chaque usine.

La méthodologie proposée par Beaudoin et al. (2008) permet de comparer différents scénarios utilisant la fonction d'anticipation de Schneeweiss (2012) afin d'aider les gestionnaires à la prise de décisions. Cette méthodologie est détaillée dans le chapitre suivant, à la section 4.3 *Méthode de génération de scénarios*.

CHAPITRE 4

EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS

Ce chapitre présente d'abord les caractéristiques des principales données utilisées pour l'étude de cas. Les données présentées sont caractéristiques du problème étudié, c'est-à-dire du secteur forestier. Le chapitre décrit ensuite la méthode utilisée pour générer des scénarios permettant une meilleure prise de décision par les gestionnaires. Il se termine par la présentation des résultats obtenus et leur analyse.

4.1 Données relatives à la planification des ressources forestières

La planification des ressources forestières se fait sur des zones géographiques agrégées. Plusieurs peuplements ont été agrégés pour former des superficies de plus grande taille ayant des caractéristiques similaires. Les unités d'aménagement correspondent aux zones étudiées lors de la planification tactique, et donc lors de l'allocation des ressources aux usines. Chaque unité d'aménagement est composée de plusieurs secteurs d'intervention, eux-mêmes composés de plusieurs chantiers de coupe qui sont étudiés lors de la planification opérationnelle, et donc lors de la localisation des chantiers de coupe. Chaque région du Canada possède plusieurs dizaines d'unités d'aménagement. Cependant, dans cette étude de cas, simulée et inspirée du contexte du secteur forestier au Québec, seules deux unités d'aménagement ont été étudiées. Chaque unité d'aménagement est divisée en une dizaine de chantiers de coupe.

Pour chaque zone géographique, un volume de bois est déterminé selon l'essence et la qualité du bois. Quatre essences ont été étudiées : 1) SEPM (Sapins, Épinettes, Pins gris et Mélèzes), 2) Thuyas, 3) Peupliers et 4) Feuillus. Ces essences peuvent avoir trois qualités différentes : bois de sciage, bois de placage et bois de pâtes à papier (BS, BP, BPP). Cependant, toutes les qualités ne sont pas disponibles pour toutes les essences (Tableau 4-1). Les essences et les qualités étudiées dans cette étude de cas sont celles présentes au Québec.

Tableau 4-1 Essences et qualités de bois disponibles dans les unités d'aménagement étudiées

Essence / Qualité	Bois de sciage	Bois de placage	Bois de pâtes à papier
SEPM	X		
Thuyas	X		
Peupliers	X	X	X
Feuillus	X	X	X

La possibilité forestière est déterminée pour chaque essence et qualité de bois, et pour chaque unité d'aménagement. Les possibilités forestières de chaque essence et qualité de bois ont été générées aléatoirement de manière à obtenir suffisamment de bois pour fournir les usines au-delà des volumes minimums qu'elles exigent.

Le volume disponible pour chaque essence et qualité de bois, et pour chaque chantier de coupe a été estimé. L'estimation a été réalisée de façon à ce que la somme des volumes des chantiers de coupe pour une essence et une qualité de bois précises varie légèrement du volume pour l'unité d'aménagement les englobant et pour les mêmes essences et qualités de bois. Ces volumes ont été générés selon une loi normale, ayant pour moyenne une valeur proche de la possibilité forestière divisée par le nombre de chantiers de coupe dans l'unité d'aménagement, et pour écart-type une valeur aléatoire comprise entre 1 et 10.

Les performances des usines ont été considérées identiques pour chaque essence de bois. La capacité annuelle de chaque usine et les volumes annuels minimums à allouer à chaque usine sont présentés en annexe dans les tableaux A I-1 et A I-2. Ces deux paramètres ainsi que les valeurs cibles et les valeurs moyennes anticipées du critère du modèle de localisation des chantiers de coupe ont été générés aléatoirement, dans cette étude de cas. Le critère étudié est le coût d'approvisionnement. Il correspond aux coûts liés au transport du bois entre les chantiers de coupe et les usines, ainsi qu'aux coûts engendrés par les opérations de coupe. Par conséquent, les coûts d'approvisionnement varient selon les usines et les chantiers de coupe, puisqu'ils dépendent de leurs emplacements et des routes les reliant.

4.2 Méthode de génération des scénarios

Lors de l'utilisation d'une fonction d'anticipation, il est utile de générer des scénarios afin d'aider les gestionnaires à la prise de décisions. En effet, ne pouvant prédire le futur, la génération de scénarios permet de se rapprocher de celui-ci grâce à des analyses statistiques. La méthode de Beaudoin et al. (2008) pour la génération des scénarios lors de l'intégration des niveaux de planification a été adaptée pour correspondre au problème étudié.

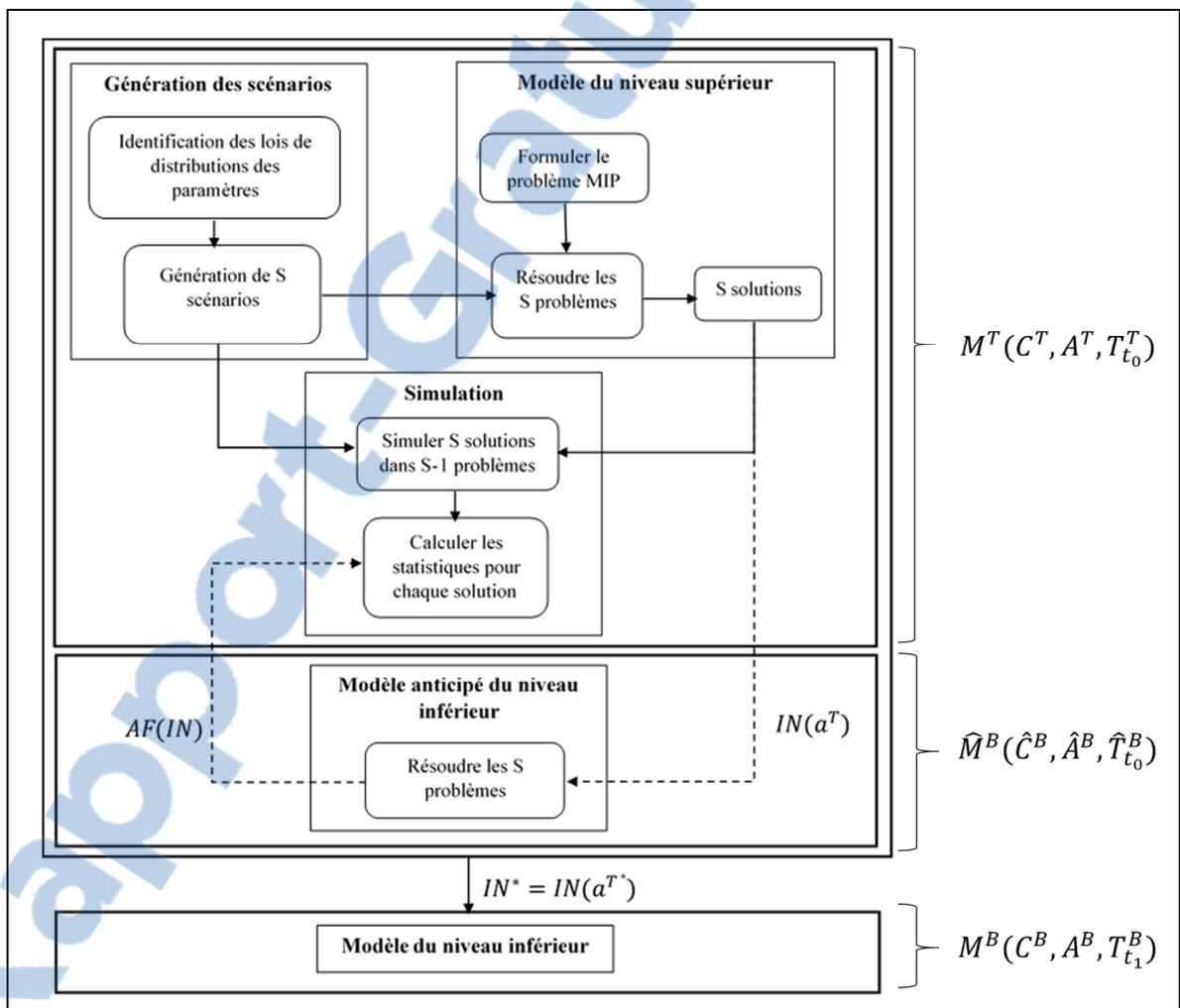


Figure 4-1 Génération des scénarios pour la planification intégrée

Adaptée de Beaudoin et al. (2008)

Dans un premier temps, des scénarios ont été créés par la génération des valeurs pour les paramètres du modèle mathématique du niveau supérieur selon leurs lois de distribution. Ces scénarios ont ensuite été étudiés avec le modèle du niveau supérieur. Dans cette étude, il s'agit du modèle d'allocation des ressources. Pour chaque scénario, une solution a été obtenue. Ces solutions ont ensuite été soumises à deux études en parallèle. La première étude a soumis chaque solution aux autres scénarios, en dehors du scénario duquel elle est obtenue, pour vérifier sa faisabilité dans ceux-ci. La seconde étude a transmis chaque solution du modèle du niveau supérieur en tant que décisions au modèle anticipé du niveau inférieur pour vérifier sa faisabilité au niveau inférieur. Dans cette étude, le niveau inférieur est le modèle de localisation des chantiers de coupe. À partir de ces deux études, une analyse statistique de la situation peut être réalisée afin de déterminer la robustesse et la faisabilité de chaque solution.

Avec les résultats obtenus, les gestionnaires connaissent les solutions du modèle du niveau supérieur qui sont réalisables lors de la planification du niveau inférieur et qui sont également robustes pour les différents scénarios. En suivant cette méthode, les gestionnaires ont davantage d'information pour prendre une décision pérenne et robuste pour les deux niveaux de planification.

4.3 Résultats de l'étude de cas

Chaque scénario a été codé avec le logiciel de programmation AMPL, qui utilise le solveur CPLEX v.12.7. Les scénarios du modèle d'allocation des ressources sont composés de 120 variables et 111 contraintes. Les scénarios du modèle de localisation des chantiers de coupe avec la méthode d'intégration sont composés de 4950 variables et 1025 contraintes, tandis que les scénarios du modèle de localisation des chantiers de coupe sans la méthode d'intégration ont 4950 variables et 1485 contraintes. Le temps de résolution de chaque scénario a été de quelques secondes.

Six scénarios ont été générés pour le modèle d'allocation des ressources. Seules les valeurs de la possibilité forestière pour chaque qualité de bois varient selon les scénarios (tableau A I-3).

Les capacités des usines selon les essences de bois, les volumes minimums à allouer aux usines selon les qualités de bois et les scores de performance des usines sont identiques dans les six scénarios.

Le modèle d'allocation des ressources cherche à maximiser le produit des volumes alloués aux usines par le score de performance de celles-ci. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4-2. Les trois premiers scénarios ont leur fonction-objectifs égales car la capacité des usines est arrivée à saturation, c'est-à-dire que les volumes alloués aux usines utilisent au maximum la capacité des usines. Cependant, il n'est pas possible de comparer les résultats numériques des fonctions-objectifs entre les différents scénarios. En effet, les paramètres de chaque scénario diffèrent pour les possibilités forestières. Par conséquent, les scénarios 4, 5 et 6 ne sont pas moins performants que les trois premiers scénarios, mais ont des possibilités forestières différentes.

Afin d'obtenir l'analyse de sensibilité pour les solutions obtenues du modèle d'allocation, les solutions de chaque scénario ont été testées avec les paramètres des cinq autres scénarios. Aucune solution réalisable n'a été trouvée. Deux interprétations peuvent être réalisées. Premièrement, la variation entre les scénarios est très grande, et les solutions trouvées ne peuvent satisfaire que le scénario dont elles sont tirées. Ceci ne permet pas une grande flexibilité de la part des gestionnaires. Deuxièmement, il se peut que les variations générées aléatoirement dans cette étude de cas ne soient pas représentatives de la réalité. Dans une étude de cas réelle, il faudra vérifier les lois de distributions des possibilités forestières par essence et qualité de bois.

Tableau 4-2 Résultats de la fonction-objectif en m³ pour les six scénarios du modèle d'allocation des ressources

Scénario	1	2	3	4	5	6
Fonction-objectif (m³)	7005	7005	7005	6295	6815	6925

Pour chaque scénario du modèle d'allocation des ressources, dix sous-scénarios du modèle de localisation des chantiers de coupe ont été réalisés. Dans chaque sous-scénario, les valeurs cibles du critère sont identiques, mais les valeurs moyennes anticipées du critère sont différentes pour les dix sous-scénarios. Pour chaque scénario et sous-scénario, les volumes disponibles anticipés par chantier de coupe ont des valeurs différentes, puisqu'elles ont été générées aléatoirement selon une loi de distribution normale ayant des paramètres variant selon les scénarios (voir la section *4.1 Données relatives à la planification des ressources forestières*). Par conséquent, les sous-scénarios peuvent être comparés pour chaque scénario, mais non pour tous les scénarios puisque les possibilités forestières sont différentes pour chaque scénario.

Le modèle de localisation des chantiers de coupe cherche à minimiser les écarts entre les valeurs cibles et les valeurs moyennes anticipées du critère pour chaque usine. Les résultats obtenus avec la méthode de planification intégrée (I) sont présentés dans le tableau 4-3. Les sous-scénarios étant non réalisables sont représentés par un « X ». Les scénarios pour lesquels des sous-scénarios sont non réalisables sont le premier et le cinquième scénario. Les sous-scénarios ne peuvent satisfaire la demande des usines, c'est-à-dire que les volumes générés par essence et par qualité de bois ne peuvent satisfaire l'allocation des volumes de bois aux usines.

Pour des fins de comparaison, un onzième sous-scénario a été créé. Ce sous-scénario représente la situation où les gestionnaires n'utiliseraient pas le modèle avec la fonction d'anticipation (I), mais utiliseraient la planification hiérarchique classique (H), c'est-à-dire que les solutions du modèle d'allocation des ressources sont directement transmises au modèle de localisation des chantiers de coupe en tant que décisions. Le modèle mathématique utilisé est similaire à celui de localisation des chantiers de coupe avec les contraintes de couplage présenté dans la section *3.3.3 Modèle de localisation des chantiers de coupe*. Des paramètres ont été ajoutés ainsi que des contraintes afin de respecter les décisions prises lors de la résolution du modèle d'allocation des ressources. Les paramètres binaires suivants ont été ajoutés afin de garantir la stabilité des solutions : 1) un paramètre qui détermine si les unités d'aménagement sont

ouvertes et 2) un paramètre de liaison entre les unités d'aménagement et les chantiers de coupe. La contrainte de la demande minimale du modèle de localisation des chantiers de coupe avec la planification intégrée a été modifiée pour la planification hiérarchique : le volume minimum à allouer aux usines est maintenant égal à la somme des volumes alloués aux usines pour chaque essence et qualité de bois pour l'ensemble des unités d'aménagement. Les contraintes de couplage ne sont pas présentes dans la planification hiérarchique, mais une contrainte a été ajoutée afin de respecter les volumes déterminés lors du modèle d'allocation des ressources. Deux contraintes ont été ajoutées pour la planification hiérarchique : 1) une contrainte qui ouvre un chantier de coupe uniquement si l'unité d'aménagement auquel il appartient est ouverte, et 2) une contrainte qui borne la somme des volumes alloués aux usines pour tous les chantiers de coupe par la possibilité forestière pour chaque essence et qualité de bois si les unités d'aménagement sont ouvertes.

Pour les sous-scénarios résolus avec une méthode de planification hiérarchique (H), les volumes disponibles pour chaque chantier de coupe sont égaux à la moyenne des volumes disponibles anticipés des dix premiers scénarios. Pour des fins de comparaison, il en est de même pour tous les autres paramètres du modèle de localisation des chantiers de coupe résolu avec une planification hiérarchique, c'est-à-dire que pour chaque scénario d'allocation des ressources, les paramètres pour le onzième sous-scénario sont égaux à la moyenne des paramètres des dix premiers sous-scénarios. Les résultats de la fonction-objectif pour les sous-scénarios de planification hiérarchique pure et la moyenne des fonctions-objectifs des sous-scénarios avec fonction d'anticipation sont présentés dans la figure 4-2. Dans le cas où des sous-scénarios sont non réalisables, les moyennes sont réalisées sur les sous-scénarios réalisables. Les sous-scénarios ne pouvant satisfaire l'allocation des bois décidée lors du niveau supérieur sont considérés comme non réalisables. Comme la somme des écarts du critère du coût d'approvisionnement entre sa valeur cible et sa valeur réelle est à minimiser, les scénarios avec une planification intégrée (I) où tous les sous-scénarios sont réalisables obtiennent en moyenne un meilleur résultat que les scénarios avec une planification hiérarchique (H) (voir Figure 4-2).

Tableau 4-3 Résultats des écarts des coûts d’approvisionnement pour les usines en \$ pour les sous-scénarios du modèle de localisation des chantiers de coupe

Sous-scénario	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
1	6 173 770	3 223 735	5 984 330	4 649 910	X	5 518 600
2	5 766 925	3 222 845	6 028 730	4 589 040	X	5 457 200
3	5 820 530	3 021 285	5 823 385	4 547 075	X	5 344 555
4	5 464 185	3 213 745	6 246 065	4 725 665	5 949 225	5 540 795
5	5 306 880	2 819 110	5 637 550	4 137 100	X	4 690 570
6	5 486 975	2 909 765	5 504 750	4 462 310	X	5 232 745
7	X	2 882 975	5 706 250	4 299 035	X	4 960 320
8	6 080 315	3 456 500	6 189 390	4 817 965	X	5 777 130
9	X	3 081 675	5 652 265	4 353 230	X	5 020 100
10	X	2 720 180	5 561 745	4 321 545	X	5 118 910

Pour chaque sous-scénario, les informations dans le tableau 4-4 ont été compilées à partir des variables de décisions des solutions des sous-scénarios avec fonction d’anticipation. Les mêmes informations pour les sous-scénarios sans fonction d’anticipation sont présentées dans le tableau 4-5.

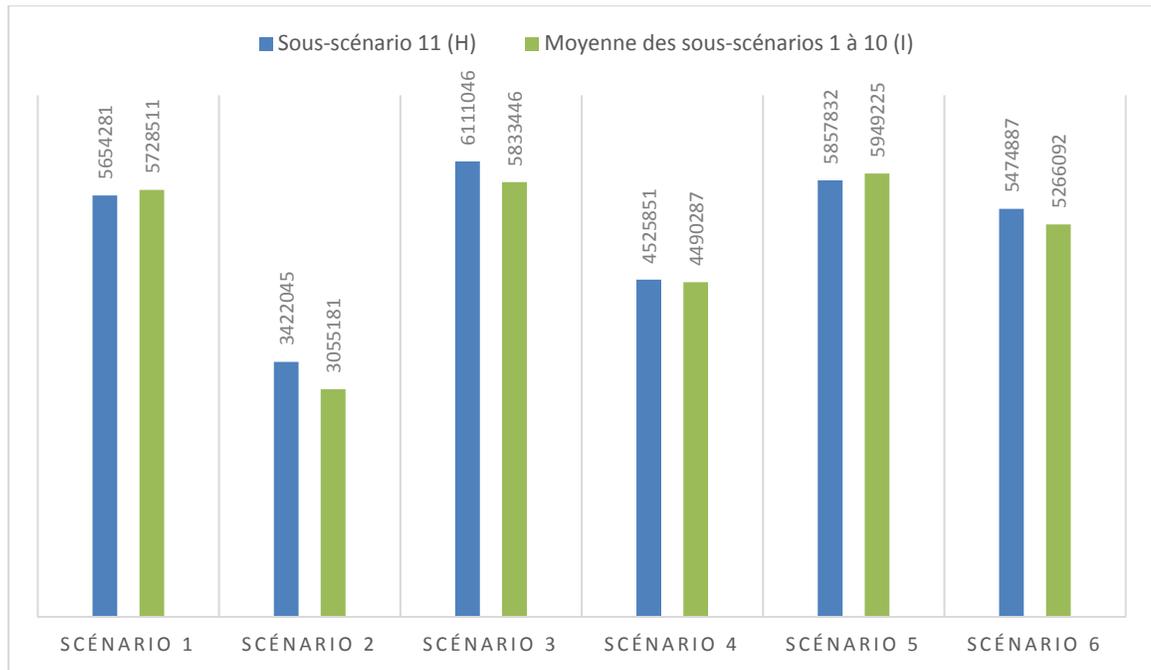


Figure 4-2 Graphique comparatif des résultats de la fonction-objectif en \$ pour les sous-scénarios de planification hiérarchique pure (H) et la moyenne des sous-scénarios avec fonction d'anticipation (I)

Pour chaque scénario, le sous-scénario sans fonction d'anticipation ouvre en moyenne autant, ou plus, de chantiers de coupe que les sous-scénarios avec fonction d'anticipation. Pour chaque scénario, le volume moyen alloué aux usines par chantier est quasiment identique pour les sous-scénarios avec la planification intégrée (I) et pour le sous-scénario avec la planification hiérarchique (H). Les volumes moyens coupés par chantier de coupe sont dans le même ordre de grandeur pour les deux types de sous-scénarios. Cependant, les scénarios 1 à 4 ont un volume plus important lors des sous-scénarios sans fonction d'anticipation, contrairement aux scénarios 5 et 6 qui ont un volume plus important lors des sous-scénarios avec fonction d'anticipation. Les coûts d'approvisionnement sont plus faibles par m³ pour les sous-scénarios avec fonction d'anticipation et ayant tous les sous-scénarios réalisables que pour les sous-scénarios sans fonction d'anticipation. Par conséquent, les gestionnaires peuvent choisir des solutions qui en moyenne aboutissent à de meilleurs résultats en utilisant une planification intégrée plutôt qu'une planification hiérarchique.

Tableau 4-4 Informations supplémentaires sur les solutions obtenues pour chaque sous-scénario avec une planification intégrée (I)

Scénario	1	2	3	4	5	6
Moyenne du nombre de chantiers ouverts	19	13	19	20	20	18
Volume moyen alloué aux usines par chantier ouvert (m ³)	350,30	350	350	314,80	341	346,30
Volume moyen coupé par chantier ouvert (m ³)	1 138,34	779,16	1 196,40	868,06	1 127,35	1 168,53
Coût moyen d'approvisionnement (\$/m ³)	55,27	46,20	50,89	53,38	57,22	54,56

Tableau 4-5 Informations supplémentaires sur les solutions obtenues pour chaque sous-scénario avec une planification hiérarchique (H)

Scénario	1	2	3	4	5	6
Nombre de chantiers ouverts	20	13	19	20	20	20
Volume moyen alloué aux usines par chantier ouvert (m ³)	350,25	538,84	368,68	314,75	340,75	346,25
Volume moyen coupé par chantier ouvert (m ³)	1 141,18	780,53	1 197,63	870	1 125,70	1 048,70
Coût moyen d'approvisionnement (\$/m ³)	53,94	50,51	53,05	53,90	55,31	56,01

4.4 Analyse des résultats

La méthode d'intégration avec une fonction d'anticipation permet d'effectuer une analyse statistique afin de déterminer les solutions plus robustes aux variations de la demande et des impondérables. Sur les six scénarios, deux seulement ont obtenu plusieurs sous-scénarios non réalisables. Ces deux scénarios ont également une fonction-objectif plus grande en moyenne sur les sous-scénarios avec fonction d'anticipation.

Le scénario 5 a un seul sous-scénario de réalisable avec la fonction d'anticipation et le sous-scénario sans fonction d'anticipation est réalisable. Dans ce cas, il y a de fortes probabilités que les décisions prises lors du niveau d'allocation des ressources ne puissent être réalisables lors de la planification de localisation des chantiers de coupe. Les gestionnaires devraient chercher à modifier les paramètres ou les contraintes de ce scénario de façon à avoir davantage de sous-scénarios réalisables. Le sous-scénario avec la planification hiérarchique est réalisable ici, car ces paramètres sont égaux à la moyenne des paramètres des dix sous-scénarios résolus avec la planification intégrée. Les paramètres ainsi générés sont donc moins contraignants et permettent de trouver une solution réalisable avec une planification hiérarchique.

Le scénario 1 a trois sous-scénarios sur dix de non réalisables. Les informations supplémentaires dans les tableaux 4-4 et 4-5, ainsi que le résultat des fonctions-objectifs (Figure 4-2), montrent que ce scénario est en moyenne plus coûteux dans les sous-scénarios avec fonction d'anticipation que dans le sous-scénario sans fonction d'anticipation. Si ces informations ne suffisent pas à prendre une décision, les gestionnaires devraient réaliser des études complémentaires : création de nouveau sous-scénario, création d'un scénario *worst-case*, variation des paramètres du scénario initial, etc. Ces études complémentaires permettraient d'avoir une meilleure analyse des scénarios et de leur impact sur leur faisabilité opérationnelle. Par exemple, un scénario *worst-case* permettrait d'évaluer la performance des décisions sur l'allocation des ressources pour chaque scénario pour la localisation des chantiers de coupe dans le pire des cas (manque important de certaines essences et qualités de bois,

ouverture de tous les chantiers de coupe, etc.) et de prévoir les décisions qui seraient à prendre pour minimiser l'impact de ces changements sur la planification.

Pour les quatre autres scénarios, il semble raisonnable de penser que les solutions du modèle d'allocation des ressources permettront d'avoir des solutions réalisables lors du modèle de localisation des ressources. Les décisions prises lors de l'allocation des ressources semblent robustes face aux variations du volume de bois disponible. Cependant, ne connaissant pas les valeurs acceptables pour les gestionnaires, il n'est pas possible de déterminer si les solutions seraient acceptables pour les gestionnaires, c'est-à-dire que les solutions proposées peuvent ne pas atteindre les objectifs attendus. Les gestionnaires pourraient générer davantage de scénarios et sous-scénarios afin d'obtenir une analyse statistique plus complète sur la faisabilité opérationnelle des décisions.

Dans les tableaux 4-4 et 4-5, le nombre de chantiers ouverts en moyenne pour chaque scénario est proche du nombre de chantiers disponibles dans cette étude de cas, soit vingt chantiers de coupe. Ceci est dû aux volumes de bois disponibles pour chaque chantier de coupe. En effet, certains bois avec une essence et une qualité précise sont très demandés par les usines, comme le bois de SEPM avec la qualité de bois de sciage. Or, pour ces essences et qualités de bois, la somme des volumes disponibles sur les vingt chantiers de coupe est très proche de la somme des volumes demandés par les usines.

L'écart entre le volume moyen coupé par chantier de coupe et le volume moyen alloué aux usines signifie qu'il y a un grand volume résiduel. Ceci est dû à un volume disponible non balancé par essence et qualité de bois, et par une importante variation de la demande par essence et qualité de bois. En effet, les volumes disponibles anticipés du bois par essence et par qualité ont été générés en fonction d'une loi de distribution ne tenant pas en compte la réelle répartition de la population des essences de bois selon les chantiers de coupe. De plus, la demande par essence de bois varie fortement, ce qui a un impact sur le nombre de chantiers de coupe à ouvrir pour satisfaire cette demande. Or, pour chaque chantier de coupe ouvert, les

essences et qualités de bois qui ne sont pas demandées par les usines doivent être tout de même coupées, ce sont les volumes résiduels.

Le coût moyen d'approvisionnement pour chaque scénario reste proche de la valeur de 50\$, ce qui est pertinent puisque les valeurs cibles pour chaque usine sont comprises entre 50\$ et 55\$. Cependant les variations observées entre les coûts moyens d'approvisionnement pour chaque scénario sont dues aux choix d'ouverture des chantiers de coupe et aux variations dans la génération aléatoire des valeurs moyennes anticipées des coûts d'approvisionnement pour chaque scénario.

Le tableau 4-6 présente les écarts en pourcentage entre les solutions trouvées pour les sous-scénarios avec planification hiérarchique et les solutions trouvées avec la planification intégrée. Les écarts négatifs représentent les situations où les solutions avec la planification hiérarchique sont meilleures, tandis que les écarts positifs représentent les situations où la planification intégrée donne de meilleurs résultats. Les « X » représentent les sous-scénarios n'ayant pas de solution réalisable. En se basant sur le nombre de sous-scénarios ayant un écart positif et sur l'écart entre les solutions des sous-scénarios avec planification hiérarchique et la somme des sous-scénarios avec planification intégrée, les gestionnaires peuvent identifier les scénarios qui sont statistiquement plus performants et plus robustes aux changements.

Pour obtenir une meilleure analyse de la performance de la méthodologie proposée dans ce mémoire, il faudrait confirmer ces hypothèses par une étude sur un cas réel et utiliser des données historiques afin de pouvoir réaliser une comparaison plus détaillée entre une planification hiérarchique et la méthode proposée dans ce mémoire.

Tableau 4-6 Écart en % entre les résultats de la fonction-objectif des sous-scénarios avec la planification hiérarchique et des sous-scénarios avec planification intégrée

Sous-scénario	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
1	-9,2	5,8	2,1	-2,7	X	-0,8
2	-2,0	5,8	1,3	-1,4	X	0,3
3	-2,9	11,7	4,7	-0,5	X	2,4
4	3,4	6,1	-2,2	-4,4	-1,6	-1,2
5	6,1	17,6	7,7	8,6	X	14,3
6	3,0	15,0	9,9	1,4	X	4,4
7	X	15,8	6,6	5,0	X	9,4
8	-7,5	-1,0	-1,3	-6,5	X	-5,5
9	X	9,9	7,5	3,8	X	8,3
10	X	20,5	9,0	4,5	X	6,5
Moyenne des sous-scénarios 1 à 10	-1,3	10,7	4,5	0,8	-1,6	3,8

4.5 Recommandations

Dans un cas réel, les paramètres, qui ont été générés aléatoirement dans cette étude de cas, seraient générés à partir de données historiques permettant de connaître leurs lois de distribution. Ainsi, les scénarios générés permettraient d'obtenir une analyse statistique plus fiable sur les décisions du modèle d'allocation des ressources. Il faudrait également générer davantage de scénarios et sous-scénarios afin d'obtenir une analyse plus robuste.

Une fois que la robustesse de cette méthode d'intégration avec fonction d'anticipation aura été étudiée dans une étude de cas avec des données historiques, il sera possible au MFFP de la déployer. Cependant certains défis surviendront à cette étape : le choix des contraintes des

modèles mathématiques, la collecte de données, la génération de scénarios et les décisions à prendre une fois l'analyse statistique obtenue.

Le choix des contraintes des modèles mathématiques est une autre source de défis, puisque ce choix a un impact direct sur les données nécessaires à collecter. De plus, les contraintes choisies auront un impact sur les solutions obtenues pour les planifications de la gestion des ressources forestières. À partir de notre étude de cas, le MFFP devra déterminer quels critères prendre en compte lors du modèle anticipé de localisation des chantiers de coupe, quel type de score de performance étudié (économique, environnemental, social, ou une combinaison de ces trois aspects), ainsi que les contraintes à ajouter pour obtenir des modèles de planification plus complets (dispersion spatiale pour le modèle de localisation des chantiers de coupe, etc.).

La collecte de données peut être fastidieuse si les données nécessaires ne sont actuellement pas disponibles. Par conséquent, il faudra vérifier leur disponibilité, et au besoin créer un système de collecte qui soit efficace et peu coûteux en temps et argent pour le MFFP. Cependant, il est possible que des approximations ou des agrégations soient nécessaires pour limiter les coûts supplémentaires dans un premier temps. Cette étape est la plus cruciale dans le processus de déploiement d'une méthode de planification, puisqu'elle a une incidence directe sur les étapes suivantes, et par conséquent sur la fiabilité des solutions obtenues.

La génération des scénarios nécessite de connaître les lois de distribution des paramètres étudiés, il faut donc s'assurer, une fois de plus, de la fiabilité des données collectées. La génération de scénarios a été largement étudiée dans la littérature par des modèles stochastiques. Une des recommandations est de créer, dans un premier temps, un scénario du « pire cas » ou *worst-case scénario* qui permet de connaître la réponse du système au « pire cas ». Cependant, pour le MFFP, il est nécessaire de générer une multitude de scénarios pour réaliser une analyse statistique des résultats obtenus pour connaître la robustesse et la faisabilité opérationnelle des décisions tactiques. Un des défis de cette étape est de déterminer le nombre de scénarios à générer pour obtenir un ratio intéressant entre un taux de fiabilité élevé et un temps de calcul faible.

Une fois l'analyse statistique obtenue, les gestionnaires devront choisir la solution de planification la plus performante. Ainsi, les solutions ayant plusieurs sous-scénarios non réalisables sont moins robustes que les solutions n'ayant aucun sous-scénario non réalisable. Cependant, il se peut que les gestionnaires trouvent plus pertinente une solution moins robuste, car elle engendre plus de gain. Par conséquent, un équilibre entre robustesse de la solution et gain potentiel est à trouver. Dans le cas, où aucun scénario ne serait réalisable, il faut vérifier la fiabilité du modèle mathématique à représenter la réalité, ainsi que la fiabilité des données collectées. Si le modèle mathématique et les données sont fiables, les gestionnaires devront chercher à modifier les paramètres ou les contraintes du modèle d'allocation des ressources afin d'obtenir une solution opérationnelle réalisable. Par exemple, les contraintes qui pourraient être modifiées sont celles sur les volumes maximums à allouer aux usines. Ces derniers sont basés sur la capacité maximale de production des usines, mais dans le cas où il manquerait de bois, les volumes maximums à allouer aux usines pourraient être égaux à un pourcentage de leur capacité maximale.

Cette méthode d'intégration de deux niveaux de planification avec fonction d'anticipation est un outil d'aide à la prise de décisions et ne peut être comparée à une optimisation de modèle mathématique, comme l'a précisé Beaudoin et al. (2008). La méthodologie présentée dans ce mémoire permet de générer des scénarios afin de déterminer lors de la planification de l'allocation des ressources si les décisions prises seront réalisables lors de la localisation des chantiers de coupe. Dans le cas contraire, les gestionnaires pourront s'appuyer sur une étude statistique afin de déterminer les risques d'obtenir une solution non réalisable au niveau inférieur. Le tableau 4-7 liste les avantages et les limites de la méthode avec fonction d'anticipation étudiée dans ce mémoire.

Tableau 4-7 Tableau comparatif des avantages et des limites de la méthode étudiée dans ce mémoire

Avantages	Limites
Est un outil d'aide à la décision	N'est pas un outil d'optimisation
Analyse statistique sur la faisabilité opérationnelle des solutions	Les lois de distributions pour les paramètres doivent être justes
Permet de connaître la robustesse des solutions proposées	Demande plusieurs tests pour un bon ajustement des lois de distributions
Évite les situations d'infaisabilité opérationnelle des décisions tactiques	Nécessite beaucoup de données

CONCLUSION

Les méthodes actuelles de planification, aussi bien les approches monolithiques que les planifications hiérarchiques, créent des divergences dans les solutions des différents niveaux de planification. Les méthodes d'intégration de plusieurs niveaux de planification permettraient de réduire ces divergences.

Dans cette recherche, une méthode d'intégration tactique-opérationnelle d'une planification hiérarchique a été développée et appliquée à une étude de cas dans le secteur forestier. Cette méthode a utilisé des versions de deux modèles mathématiques existants dans le processus de planification des ressources forestières : un modèle d'allocation des ressources et un modèle de localisation des chantiers de coupe. Ces deux modèles font partie d'une planification hiérarchique qui entraîne des divergences entre leurs solutions. Ces divergences peuvent être d'ordre spatial, temporel ou liées aux contraintes elles-mêmes. Afin de réduire ces divergences, la méthodologie de Schneeweiss (2012) a été utilisée pour introduire une fonction d'anticipation lors de la planification du niveau supérieur pour anticiper la réaction du niveau inférieur à ses décisions.

La méthode de Beaudoin et al. (2008) pour la génération de scénarios a été utilisée pour réaliser une analyse sur les résultats de la méthodologie avec fonction d'anticipation présentée dans ce mémoire. La génération de scénario et l'analyse statistique des résultats obtenus aident les gestionnaires à la prise de décisions. Dans l'étude de cas menée dans ce mémoire, le scénario 5 a permis d'identifier un cas où les décisions du niveau supérieur ont une forte probabilité de se révéler non réalisables lors de la planification du niveau inférieur. La planification intégrée permet donc d'aider les gestionnaires à détecter lors de la planification du niveau supérieur les décisions qui entraîneraient avec une très forte probabilité une situation non réalisable au niveau inférieur.

Cependant, des améliorations peuvent être apportées à la méthode présentée dans ce mémoire lors de futures recherches. Une première approche serait de réaliser une étude de cas réel, afin

de confirmer la modélisation des processus forestiers et de l'impact de la méthode avec fonction d'anticipation sur la planification des ressources forestières. Une seconde approche serait d'ajouter les hypothèses de travail qui ont été simplifiées dans ce mémoire :

- Prendre en compte les aspects environnemental et social dans le score de performance pour le modèle d'allocation des ressources. Il faut pour cela déterminer les poids de chaque aspect dans le score de performance final et obtenir une analyse des performances des usines par des experts du secteur forestier.
- Rechercher à diminuer la dispersion spatiale des chantiers de coupe dans le modèle de localisation des chantiers de coupe. Ainsi, en diminuant la distance totale entre les chantiers de coupe à ouvrir, les coûts d'entretien des routes pour accéder aux chantiers de coupe seraient diminués.
- Faire la différenciation entre les scieries et les usines de pâtes à papier dans les deux modèles mathématiques, afin de réaliser une allocation plus réaliste des bois selon leur essence et leur qualité. Les contraintes de proportion des volumes de bois à allouer aux différents types d'usine seraient à ajouter au modèle d'allocation des ressources forestières.
- Ajouter des critères à respecter lors de la localisation des chantiers de coupe (volume par tige, distance entre les chantiers, etc.).

La méthodologie proposée dans ce mémoire pourrait à terme s'inscrire dans le cadre des recherches sur l'industrie 4.0. En effet, l'industrie 4.0 cherche à lier toutes les parties d'une même chaîne logistique par un système d'information commun. Dans cette optique, les méthodes d'intégration de plusieurs niveaux de planification sont une étape importante pour la modélisation des objectifs communs à toute la chaîne logistique.

Dans le secteur forestier, les concepts de l'industrie 4.0 pourraient mener à un partage des informations par Internet afin, par exemple, de diminuer les incertitudes sur les volumes de bois entre les différents échelons de la chaîne logistique lors de la planification des activités. Ces informations peuvent également servir pour mieux modéliser les courbes de croissance

des arbres de différentes essences, ou pour mieux modéliser les lois de distribution des bois disponibles pour chaque chantier de coupe selon l'essence et la qualité.

L'industrie 4.0 permettrait un partage d'information en temps réel entre les usines et le MFFP. Ainsi, les volumes réellement disponibles par chantiers de coupe, et donc par unité d'aménagement, pourraient être plus rapidement disponibles et permettraient d'ajuster les décisions de planification afin d'optimiser la gestion des ressources forestières réellement disponible. Par exemple, lors d'une année avec une pénurie de bois pour une certaine essence et qualité de bois, cela permettra aux usines d'accepter des concessions sur les volumes minimums à leur allouer pour cette année en contrepartie d'une augmentation pour les années suivantes.

Au final, dans le secteur forestier, le système de partage d'information de l'industrie 4.0 permet de diminuer les divergences spatiales et temporelles observées avec le système actuel.

ANNEXE I

VALEURS DES PARAMÈTRES DE L'ÉTUDE DE CAS

Tableau-A I-1 Capacités des usines en m³ selon l'essence du bois

	Usine 1	Usine 2	Usine 3	Usine 4	Usine 5
SEPM	83	65	53	58	81
Thuyas	81	43	79	78	31
Peupliers	65	63	84	56	79
Feuillus	51	97	85	70	99

Tableau-A I-2 Volumes minimums en m³ à attribuer aux usines selon la qualité du bois

	Usine 1	Usine 2	Usine 3	Usine 4	Usine 5
BS_SEPM	2	16	21	11	20
BS_Thuyas	9	24	22	12	5
BS_Peupliers	3	21	17	14	21
BS_Feuillus	2	9	17	20	8
BP_Peupliers	12	1	10	2	2
BP_Feuillus	2	9	4	9	16
BPP_Peupliers	0	15	0	24	7
BPP_Feuillus	11	22	12	16	8

Tableau-A I-3 Possibilités forestières en m³ des unités d'aménagement selon la qualité du bois pour les six scénarios

	S1	S1	S2	S2	S3	S3	S4	S4	S5	S5	S6	S6
	Unité											
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
BS_SEPM	283	150	412	294	308	178	83	115	67	317	78	347
BS_Thuyas	422	459	432	180	410	179	69	298	134	140	51	245
BS_Peupliers	113	351	111	457	278	171	254	271	492	431	80	221
BS_Feuillus	191	175	497	167	434	476	326	87	164	252	420	204
BP_Peupliers	470	284	116	394	416	424	60	221	349	244	185	325
BP_Feuillus	386	147	149	236	188	114	256	182	316	304	247	327
BPP_Peupliers	412	252	255	170	179	328	56	321	364	262	100	499
BPP_Feuillus	137	173	221	453	405	280	320	303	371	236	250	391

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abasian, F., Rönnqvist, M., Marier, P., Gill-Couture, JG., & Fjeld, D. (2016, août). *The transportation game*. Communication présentée à la 11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM 2016, Montreal.
- Andersson, Daniel (2005). *Approaches to integrated strategic/tactical forest planning*. (Thèse de license, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå).
- Arntzen, Bruce C, Brown, Gerald G, Harrison, Terry P, & Trafton, Linda L (1995). Global supply chain management at Digital Equipment Corporation. *Interfaces*, 25(1), 69-93.
- Baker, Kenneth R. (1989). Lot-sizing procedures and a standard data set: a reconciliation of the literature. *Journal of Manufacturing and Operations Management*, 2(3), 199-221.
- Beaudoin, D., Frayret, J. M., & Lebel, L., (2008). Hierarchical forest management with anticipation: An application to tactical-operational planning integration. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(8), 2198-2211.
- Bouchard, M., D'Amours, S., Rönnqvist, M., Azouzi, R. & Gunn, E. (2017). Integrated optimization of strategic and tactical planning decisions in forestry. *European Journal of Operational Research*, 259(3), 1132-1143.
- Boukherroub, Tasseda, D'Amours, Sophie, & Rönnqvist, Mikael (2017a). Sustainable Forest Management using Decision Theaters: Rethinking Participatory Planning.
- Boukherroub, Tasseda, LeBel, Luc, & Ruiz, Angel (2017b). A framework for sustainable forest resource allocation: a Canadian case study. *Omega*, 66, 224-235.
- Brahimi, Nadjib, Dauzere-Peres, Stéphane, Najid, Najib M & Nordli, Atle (2006). Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*, 168(1), 1-16.
- D'Amours, Sophie, Rönnqvist, Mikael, & Weintraub, Andres (2008). Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. *INFOR : Information Systems and Operational Research*, 46(4), 265-281.
- Daskin, Mark S. (2008). What you should know about location modeling. *Naval Research Logistics (NRL)*, 55(4), 283-294.
- Dekle, Jamie, Lavieri, Mariel S, Martin, Erica, Emir-Farinas, Hülya et Francis, Richard L (2005). A Florida county locates disaster recovery centers. *Interfaces*, 35(2), 133-139.

- Dzupire, Nelson Christopher, & Nkansah-Gyekye, Yaw (2014). A Multi-Stage Supply Chain Network Optimization Using Genetic Algorithms. *Mathematical Theory and Modeling*, 4(8), 18-28.
- Fattahi, M, Mahootchi, M, & Moattar Husseini, SM (2015). Integrated strategic and tactical supply chain planning with price-sensitive demands. *Annals of Operations Research*, 242(2), 423-456.
- Fleischmann, Bernhard, Ferber, Sonja, & Henrich, Peter (2006). Strategic planning of BMW's global production network. *Interfaces*, 36(3), 194-208.
- Gelders, Ludo F, Pintelon, Liliane M, & Van Wassenhove, Luk N (1987). A location-allocation problem in a large Belgian brewery. *European Journal of Operational Research*, 28(2), 196-206.
- Gfrerer, Helmut, & Zäpfel, Günther (1995). Hierarchical model for production planning in the case of uncertain demand. *European Journal of Operational Research*, 86(1), 142-161.
- Gorman, Michael F, & Ahire, Sanjay (2006). A major appliance manufacturer rethinks its inventory policies for service vehicles. *Interfaces*, 36(5), 407-419.
- Jena, Sanjay Dominik, Cordeau, Jean-François, & Gendron, Bernard (2015). Modeling and solving a logging camp location problem. *Annals of Operations Research*, 232(1), 151-177.
- Klibi, Walid, & Martel, Alain (2013). The design of robust value-creating supply chain networks. *OR Spectrum*, 35(4), 867-903.
- Klibi, Walid, Martel, Alain, & Guitouni, Adel (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 283-293.
- Ouhimmou, Mustapha, D'Amours, Sophie, Beauregard, Robert, Ait-Kadi, Daoud, & Chauhan, Satyaveer Singh (2009). Optimization helps Shermag gain competitive edge. *Interfaces*, 39(4), 329-345.
- Ouhimmou, Mustapha, D'Amours, Sophie, Beauregard, Robert, Ait-Kadi, Daoud, & Chauhan, S Singh (2008). Furniture supply chain tactical planning optimization using a time decomposition approach. *European Journal of Operational Research*, 189(3), 952-970.
- Ouhimmou, Mustapha, Haddad, Samir, & Boukherroub, Tasseda (2015). Decision support system for selection of harvest areas and wood allocation to mills. Dans *15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM 2015, May 11-13, 2015, Vol. 48(3)*, (p. 628-633). Ottawa, Canada : Coll. « IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline) »

- Paradis, Gregory, LeBel, Luc, D'Amours, Sophie, & Bouchard, Mathieu (2013). On the risk of systematic drift under incoherent hierarchical forest management planning. *Canadian journal of forest research*, 43(5), 480-492.
- Sabri, Ehap H., & Beamon, Benita M. (2000). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 28(5), 581-598.
- Schneeweiss, Christoph. 2003. Distributed decision making—a unified approach. *European Journal of Operational Research*, 150(2), 237-252.
- Schneeweiss, Christoph (2012). *Distributed decision making*. Springer Science & Business Media.
- Schneeweiss, Christoph, & Zimmer, Kirstin (2004). Hierarchical coordination mechanisms within the supply chain. *European Journal of Operational Research*, 153(3), 687-703.
- Schneeweiss, Christoph (1995). Hierarchical structures in organisations: A conceptual framework. *European Journal of Operational Research*, 86(1), 4-31.
- Silver, Edward A, & Meal, Harlan C (1973). A heuristic for selecting lot size quantities for the case of a deterministic time-varying demand rate and discrete opportunities for replenishment. *Production and inventory management*, 14(2), 64-74.
- Vidal, Carlos J., & Goetschalckx, Marc (1997). Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98(1), 1-18.
- Zhang, Xinhui, Meiser, Doug, Liu, Yan, Bonner, Brett, & Lin, Lebin (2014). Kroger uses simulation-optimization to improve pharmacy inventory management. *Interfaces*, 44(1), 70-84.
- Zhu Chen, Iris, Ouhimmou, Mustapha, & Rönnqvist, Mikael (2016, août). *Optimization of harvest planning of forest stands infested by spruce budworm using stochastic programming*. Communication présentée à la 11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM 2016, Montreal.