



Modélisation et optimisation multi-niveaux du transport forestier

Kamel Moad

► To cite this version:

Kamel Moad. Modélisation et optimisation multi-niveaux du transport forestier. Gestion et management. Université de Bordeaux, 2016. Français. <NNT : 2016BORD0101>. <tel-01377249>

HAL Id: tel-01377249

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01377249>

Submitted on 6 Oct 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR
SPÉCIALITÉ PRODUCTIQUE

par Kamel MOAD

**Modélisation et optimisation multi-niveaux
du transport forestier**

Sous la direction de Jean-Paul BOURRIERES
(co-directeur Julien FRANCOIS)

EN CO-TUTELLE AVEC L'UNIVERSITE LAVAL, QUEBEC, CANADA
Sous la direction de Luc LEBEL

Soutenue le 29 juin 2016

Membres du jury :

M. BOURRIERES, Jean-Paul	Professeur, Université de Bordeaux	Directeur
M. LEBEL, Luc	Professeur, Université Laval, Québec	Directeur
M. FRANCOIS, Julien	Maître de conférences, Université de Bordeaux	Co-directeur
M. THOMAS, André	Professeur, Université de Lorraine	rapporteur
M. AUDY, Jean-François	Professeur, Université du Québec à Trois-Rivières	rapporteur
Mme. LEHOUX, Nadia	Professeur, Université Laval, Québec	Examineur
Mme. VUILLERMOZ, Morgan	Ingénieure études et recherche, FCBA, Paris	invité
M. DUCQ, Yves	Professeur, Université de Bordeaux	Président

Résumé

Modélisation et optimisation multi-niveaux du transport forestier

Cette thèse est une contribution à la modélisation, la planification et l'optimisation du transport pour l'approvisionnement en bois de forêt des industries de première transformation. Dans ce domaine, les aléas climatiques (mise au sol des bois par les tempêtes), sanitaires (attaques bactériologiques et fongiques des bois) et commerciaux (variabilité et exigence croissante des marchés) poussent les divers acteurs du secteur (entrepreneurs et exploitants forestiers, transporteurs) à revoir l'organisation de la filière logistique d'approvisionnement, afin d'améliorer la qualité de service (adéquation offre-demande) et de diminuer les coûts.

L'objectif principal de cette thèse était de proposer un modèle de pilotage améliorant la performance du transport forestier, en respectant les contraintes et les pratiques du secteur.

Les résultats établissent une démarche de planification hiérarchique des activités de transport à deux niveaux de décision, tactique et opérationnel. Au niveau tactique, une optimisation multi-périodes permet de répondre aux commandes en minimisant l'activité globale de transport, sous contrainte de capacité agrégée des moyens de transport accessibles. Ce niveau permet de mettre en œuvre des politiques de lissage de charge et d'organisation de sous-traitance ou de partenariats entre acteurs de transport. Au niveau opérationnel, les plans tactiques alloués à chaque transporteur sont désagrégés, pour permettre une optimisation des tournées des flottes, sous contrainte des capacités physiques de ces flottes.

Les modèles d'optimisation de chaque niveau sont formalisés en programmation linéaire mixte avec variables binaires. L'applicabilité des modèles a été testée en utilisant un jeu de données industrielles en région Aquitaine et a montré des améliorations significatives d'exploitation des capacités de transport par rapport aux pratiques actuelles.

Les modèles de décision ont été conçus pour s'adapter à tout contexte organisationnel, partenarial ou non : la production du plan tactique possède un caractère générique sans présomption de l'organisation, celle-ci étant prise en compte, dans un deuxième temps, au niveau de l'optimisation opérationnelle du plan de transport de chaque acteur.

Mots-clés: logistique forestière, planification tactique, planification opérationnelle, collaboration

Abstract

A bi-level decision model for timber transport planning

The present manuscript tackles the supply chain forest transportation problem in the context of forestry primary industry. In this context, several risks may affect the forest supply chain: the unpredictable weather conditions (tree falling provoked by major storms); sanitary emergencies (tree pest and diseases); and, diverse commercial circumstances (the variability of market demands). The aforementioned issues motivate the diverse forest sector protagonists (entrepreneurs, forest operators and drivers) to seek support for improving their logistic operations. The aim of this effort is to improve the service quality (offer-demand agreement) diminishing in this way the total costs. Therefore, the main goal of this thesis is the proposal of a novel management model which improves forest-to-mill transport performance. At the same time, the proposed model accounts for the forest sector manners and constraints. The contribution of this thesis is threefold: first a transportation model is developed, later on the transport planning is managed, and finally an optimization procedure is proposed.

The thesis results propose a hierarchical planning for the forestry transportation. Two decision levels are suggested: tactic and operational. At a tactic level, a multi-period optimization is considered. The multi-period optimization strategy meets the customer supply demands while minimizes the global transportation activity. Such strategy takes into account the restrictions of the total available transportation means. Moreover, at this level the activity balancing politics may be developed, as well as subcontractors coordination between transport companies. On the other hand, at the operational level, the tactic planning assigned for each transporter is divided so an optimization of the fleet's transport assignation is done considering the vehicles constraints.

The decision process is modelled as a Mixed Linear Programming formulation. The application considers a data set coming from the industry settled at the Aquitaine region in France. The results have shown a significant improvement on the transport capabilities with respect to the conventional transport practices.

It is worth to mention that the decision models were designed such that they may be adapted to different context either collaborative or not. In both cases, the tactic planning has a generic purpose, in other words, it is independent of the kind of organization involved, whereas specific organizations are taken into account when planning actors' activities at the operational level.

Keywords: forestry logistics, tactical planning, operational planning, collaboration

Table des matières

RÉSUMÉ	III
ABSTRACT	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
TABLEAUX	VIII
FIGURES	IX
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : ANALYSE DE L'ÉTAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT DE LA THÈSE ...	4
1.1 Introduction	5
1.2 Chaînes d'approvisionnement (Supply Chains)	5
1.2.1 Conception des chaînes d'approvisionnement	6
1.2.2 Planification de la chaîne logistique (Supply Chain Management)	6
1.2.3 Les problèmes de transport	7
1.3 Chaîne d'approvisionnement du secteur bois-forêt	9
1.3.1 Chaîne de création de valeur de la filière-bois	9
1.3.2 Supply Chain du secteur bois-forêt	11
1.3.3 Transport du bois-forêt	13
1.4 Synthèse bibliographique	14
1.5 Positionnement et objectifs de la thèse	19
1.6 Méthodologie de recherche	24
CHAPITRE 2 : SPÉCIFICITÉS SECTORIELLES DE LA LOGISTIQUE FORESTIÈRE	26
2.1 Introduction	27
2.2 Produits transportés et débouchés	28
2.3 Écosystème du transport de bois	29
2.3.1 Configuration du réseau d'acteurs	29
2.3.2 Gestion du transport	31
2.4 Ressources du transport routier de bois ronds	32
2.4.1 Aspects réglementaires et techniques	32

2.4.2	Aspects économiques et commerciaux	34
2.5	Cas d'étude en Aquitaine	36
2.5.1	Collecte de données	37
2.5.2	Analyse des données	37
2.6	Conclusion	40
 CHAPITRE 3 : PROPOSITION D'UN MODÈLE DE PILOTAGE TACTIQUE ET OPÉRATIONNEL DU TRANSPORT FORESTIER		41
3.1	Introduction.....	42
3.2	Gisements de productivité du transport forestier	43
3.3	Mise en œuvre des modèles de pilotage.....	45
3.4	Modèle de planification tactique	50
3.4.1	Fonctionnalités du modèle d'optimisation tactique	50
3.4.2	Données.....	51
3.4.3	Variables de décision	52
3.4.4	Contraintes	52
3.4.5	Critère d'optimisation.....	53
3.5	Modélisation de l'ordonnancement opérationnel du transport.....	54
3.5.1	Fonctionnalités du modèle de planification opérationnelle.....	54
3.5.2	Données.....	54
3.5.3	Variables de décision	55
3.5.4	Contraintes	55
3.5.5	Critère d'optimisation.....	56
3.6	Indicateurs de performance.....	57
3.6.1	Indicateurs de niveau tactique	58
3.6.2	Indicateurs de niveau opérationnel.....	58
3.7	Conclusion	59
 CHAPITRE 4 : ANALYSE ET OPTIMISATION D'UN CAS INDUSTRIEL		60
4.1	Introduction.....	61
4.2	Description et analyse du cas d'étude industriel.....	61
4.2.1	Principales données.....	61
4.2.2	Analyse de performance du cas industriel (scénario As-Is)	63
4.3	Optimisation multi-niveaux	65
4.3.1	Plan d'expérimentation	66
4.3.2	Résultats et analyse	68
4.4	Conclusions.....	75

CHAPITRE 5 : VERS UNE ORGANISATION COLLABORATIVE DU TRANSPORT FORESTIER.....	78
5.1 Introduction.....	79
5.2 Évaluation comparée de scénarios collaboratifs et non collaboratifs.....	80
5.2.1 Définition des scénarios	80
5.2.2 Scénarios non collaboratifs.....	82
5.2.3 Scénarios collaboratifs.....	86
5.3 Conclusion	91
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	92
BIBLIOGRAPHIE	96
ANNEXES	102
ANNEXE 1 : LE MATERIEL DE TRANSPORT ROUTIER.....	103
ANNEXE 2 : SURCHARGE ET CONTRÔLE DE POIDS.....	104
ANNEXE 3 : EXEMPLE DE RÉSULTAT D'UNE OPTIMISATION TACTIQUE.....	105
ANNEXE 4 : EXEMPLE DE RÉSULTAT D'UNE OPTIMISATION OPÉRATIONNELLE ..	106
ANNEXE 5 : MODÈLE TACTIQUE SOUS CPLEX.....	107
ANNEXE 6 : MODÈLE OPÉRATIONNEL SOUS CPLEX	109
ANNEXE 7 : MODÈLE TACTIQUE SOUS CPLEX (MUTUALISATION DES STOCKS)	110

Tableaux

Tableau 1: Production annuelle en France et en Aquitaine (Les équipes FCBA et les professionnels, 2015)	1
Tableau 1.1: Domaine Supply Chain, adapté de (François, 2007)	15
Tableau 1.2 : Principales références en logistique bois-forêt	16
Tableau 1.3: Positionnement de la thèse	22
Tableau 2.1: Rôles transactionnels des acteurs.....	30
Tableau 2.2: Charge utile des ensembles routiers, adapté de (Arraiolos et al 2011b)	34
Tableau 2.3: Exemples de facturation des transports de bois.....	35
Tableau 2.4: Caractérisation des bassins d’approvisionnement et de livraison	38
Tableau 2.5: Distances routières moyennes et maximales	39
Tableau 3.1: Principaux indicateurs de performance pour le transport du bois-forêt	57
Tableau 4.1: Demandes cumulées par produit, sur 5 jours	62
Tableau 4.2: État initial des stocks par produit	63
Tableau 4.3: Capacité agrégée par jour	64
Tableau 4.4: Performance du scénario As-Is	64
Tableau 4.5: Performance comparée des scénarios	69
Tableau 4.6: Scénario 1, plan de charge tactique par période	70
Tableau 4.7: Scénario 2, plan de charge tactique multi-périodes.....	70
Tableau 4.8: Scénario 3, plan de charge tactique multi-périodes.....	71
Tableau 4.9: Scénario 4, plan de charge tactique multi-périodes.....	71
Tableau 4.10: Scénario 1, performances du routage opérationnel par période.....	73
Tableau 4.11: Scénario 2, performances du routage opérationnel par période.....	73
Tableau 4.12: Scénario 3, performances du routage opérationnel par période.....	74
Tableau 4.13: Scénario 4, performances du routage opérationnel par période.....	74
Tableau a- 1: Planification tactique, exemple de plan de charge multi période (scénario 3).....	105
Tableau a- 2: Planification tactique, exemple de plan de charge (scénario 3, période 1).....	105
Tableau a- 3: Planification opérationnelle, exemple de routage des camions (scénario 3, période 1)	106

Figures

Figure 1.1: Planification de la chaîne de création de valeur (d'après Fleischmann, 2008).....	7
Figure 1.2: Variantes du VRP de base, adapté de (Ben Ismail et al, 2011)	8
Figure 1.3: Chaînes de valeur de la filière-bois, d'après (D'amours et al, 2009)	10
Figure 1.4: Projets R&D de logistique forestière en Aquitaine, d'après (Arraiolos et al, 2011).....	13
Figure 1.5: Méthodologie de recherche	25
Figure 2.1: Configuration du réseau d'acteurs.....	30
Figure 2.2: Itinéraires et charge autorisées par arrêtés préfectoraux en Aquitaine (Hamasek et al, 2008)	33
Figure 2.3: Dimension maximale des ensembles routiers, d'après (Laffitte, 2013)	34
Figure 2.4: Répartition des coûts annuels de transport en France pour un camion de PTR 57 tonnes, adapté de (Jordan, 2012)	35
Figure 2.5: Exemple de données du cas d'étude	37
Figure 2.6: Calcul de la matrice des distances routières	38
Figure 2.7: Bassins d'approvisionnement et de livraison.....	39
Figure 3.1: Principe du retour en charge ou Backhauling, d'après (Epstein et al, 2007).....	44
Figure 3.2: Planification multi-niveaux du transport forestier	49
Figure 4.1: Cartographie des points d'approvisionnement et de livraison	62
Figure 5.1: Contextualisation des scénarios collaboratifs et non collaboratifs.....	81
Figure 5.2: Gestion non collaborative : zones d'activités disjointes.....	83
Figure 5.3: Gestion non collaborative : zones d'activités disjointes ; plans de charge	83
Figure 5.4: Gestion non collaborative : zones d'activités interpénétrantes ; bassins d'activité	84
Figure 5.5: Gestion non collaborative : zones d'activités inter pénétrantes ; plans de charge	85
Figure 5.6: Situation de carence locale (à gauche) et situation de carence globale (à droite)	86
Figure 5.7: Gestion collaborative : mutualisation des stocks, bilan d'activité	87
Figure 5.8: Gestion collaborative : mutualisation des stocks ; plans de charge	88
Figure 5.9: Gestion collaborative : mutualisation des demandes ; bilan d'activité	88
Figure 5.10: Gestion collaborative : mutualisation des demandes ; plans de charge	89
Figure 5.11: Gestion collaborative : mutualisation globale des ressources ; bilan d'activité.....	90
Figure 5.12: Gestion collaborative : mutualisation globale des ressources ; plans de charge.....	90
Figure a- 1: Ensemble routiers limités à 48 tonnes, d'après (Lafitte, 2013).....	103
Figure a- 2: Ensemble routiers limités à 57 tonnes, d'après (Lafitte, 2013).....	103
Figure a- 3: Types d'ensembles routiers en Aquitaine, d'après (Arraiolos et al, 2011b).....	103
Figure a- 4: Planification opérationnelle, routage d'un camion (scénario 3, période 1, camion 4).....	106

Remerciements

Cette thèse s'inscrit dans une cotutelle entre l'Université de Bordeaux et l'Université Laval à Québec. Notre recherche a été financée par le Conseil Régional d'Aquitaine et par le consortium de recherche For@rac à l'Université Laval et s'est appuyée sur une collaboration avec le FCBA (Institut Technologique Forêt, Cellulose, Bois, Construction et Ameublement).

Je tiens à remercier tout particulièrement mes trois encadrants, pour avoir suivi mes travaux très régulièrement, autour de discussions hebdomadaires qui m'ont permis d'avancer. Sans leur appui et leur dévouement, un tel travail n'aurait pu être effectué; à savoir :

- Monsieur Jean-Paul BOURRIERES, Professeur de l'Université de Bordeaux, pour avoir assuré le rôle de directeur de ma thèse du côté français, pour la qualité de son encadrement et son soutien quasi sans limite, et surtout pour avoir toujours cru en moi et en ma capacité de mener ce projet à terme.
- Monsieur Luc LEBEL, Professeur de l'Université Laval à Québec, mon directeur de thèse du côté canadien, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire, m'avoir motivé dans cette aventure, me faire profiter de sa vaste expérience en foresterie, ce qui m'a permis d'enrichir mes connaissances dans ce domaine, et dont la critique a permis d'augmenter considérablement la qualité de ce travail.
- Monsieur Julien FRANCOIS, Maître de Conférences à l'Université de Bordeaux, pour avoir suivi mes travaux très fréquemment, et pour son aide précieuse dans la réalisation de ce travail, ce qui a contribué à rendre ma recherche stimulante.

Je tiens aussi à remercier Madame Morgan VUILLERMOZ, Ingénieure études et recherche, FCBA, Paris, pour ses échanges tout au long de la thèse.

Je suis reconnaissant envers l'entreprise CASTAGNET-DUMEUO à Casteljalous (Lot et Garonne) pour la mise à disposition de données industrielles, sans oublier les professionnels, consultants et chercheurs qui ont accepté de nous rencontrer et de nous éclairer sur les problématiques-métier : MM. Cyril BASSOULET (CASTAGNET-DUMEUO), Richard EMEYRIAT (Forêt Logistique Conseil), Adrien ARRAIOLOS (Xylolink), Gaylord DOIRAT (Alliance Forêt Bois), Philippe MARIER (For@c).

Mes remerciements vont aussi à mes rapporteurs M. André THOMAS, Professeur à l'Université de Lorraine, M. Jean-François AUDY, Professeur à l'Université du Québec à Trois Rivières, ainsi qu'à Mme. Nadia LEHOUX, Professeur à l'Université de Laval à Québec, pour avoir accepté d'étudier et évaluer ce mémoire de thèse.

Je remercie tous mes collègues du Laboratoire IMS, For@c et INRIA de Rennes que j'ai pu côtoyer durant mes travaux de recherche, et plus particulièrement les membres du groupe Productique et For@c, ainsi que tout le personnel administratif et technique. Merci aussi à tous les étudiants qui ont suivi mes conseils d'encadrement et m'ont procuré une expérience enrichissante d'enseignement.

Pour terminer, je remercie toutes les personnes qui m'ont soutenu et encouragé durant ma thèse : je pense bien sûr à ma famille et à mon oncle Abdenour et j'espère leur rendre la pareille.

Introduction générale

L'industrie des produits forestiers occupe une place particulièrement importante dans l'économie de plusieurs pays dont le Canada, la France, la Suède, la Finlande et la Russie. La forêt française représente 10 % de la surface boisée européenne (en 4ème position derrière la Suède, la Finlande et l'Espagne). La France possède 16 Millions d'hectares de forêt, ce qui correspond à 29,19 % du territoire. La forêt, ressource naturelle, écologique et renouvelable est dispersée sur des zones importantes. En 2013, les bois exploités (35,8 Mm³/an) étaient principalement orientés vers trois débouchés : les scieries (18,5 Mm³/an), les industries de la pâte et du panneau (10,4 Mm³/an), les unités de bois-énergie (6,9 Mm³/an). L'Aquitaine, première région forestière française, présente des surfaces boisées réparties sur trois bassins de production (massifs) : Landes de Gascogne (990 000 ha), Dordogne-Garonne (530 000 ha) et Adour-Pyrénées (280 000 ha). Les bois exploités se caractérisent par une production variable d'une année à l'autre, avec une forte diminution de 2009 jusqu'en 2014 (Tableau 1).

Tableau 1: Production annuelle en France et en Aquitaine (Les équipes FCBA et les professionnels, 2015)

	Récolte annuelle exploitée en France Mm ³ /an	Portion du total Français que représente l'Aquitaine
2009	38,6 Mm ³	38 %
2010	39,9 Mm ³	34 %
2011	39,6 Mm ³	26 %
2012	35,2 Mm ³	21 %
2013	35,8 Mm ³	19 %
2014	37,6 Mm ³	19 %

La pérennisation du secteur relève en tout premier lieu d'une problématique de l'offre, en raison de difficultés croissantes d'approvisionnement. L'un des principaux aléas est le facteur climatique, qui, par une succession de tempêtes (Martin en 1999 et Klaus en 2009), met à mal une grande partie de la ressource exploitable, engendre un excès de ressource à court terme, suivi d'une situation de carence à moyen terme.

Au facteur climatique s'ajoutent le facteur sanitaire (attaques bactériologiques et fongiques des bois), qui a un impact sur la qualité et la disponibilité des bois, mais aussi une modification du tissu industriel, qui voit un éloignement progressif des sites consommateurs (papeteries, scieries, filière bois-énergie). Ces derniers tendent à se concentrer sur le territoire en unités plus importantes. Avec l'éloignement, vient une compétition accrue pour sécuriser les sources d'approvisionnement et une augmentation du coût de transport.

La maîtrise des coûts d'approvisionnement est donc au cœur des mutations nécessaires à la filière bois-forêt, qui demeure un secteur d'avenir, et implique l'ensemble des acteurs, propriétaires, sylviculteurs, exploitants forestiers, transporteurs pour en augmenter la rentabilité globale. Le maillon logistique, s'il n'apporte qu'une faible valeur ajoutée de transformation, est l'un des principaux facteurs de coût. Ici, la recherche de gains de productivité passe par la constitution de chaînes d'approvisionnement plus globalement performantes, à l'instar des *supply chains* qui se sont développées dans d'autres secteurs industriels (automobile, aéronautique, etc.).

Notre recherche, soutenue par le Conseil Général d'Aquitaine, s'inscrit dans une cotutelle entre l'Université de Bordeaux et l'Université Laval à Québec. Ce travail bénéficie d'une collaboration avec le FCBA (Institut Technologique Forêt, Cellulose, Bois, Construction et Ameublement), qui a accompagné notre accès au milieu professionnel et aux données métier. Dans ce contexte, nous avons analysé les problématiques de logistique forestière telles qu'elles se présentent en particulier en Aquitaine, et avons orienté nos recherches vers l'optimisation du transport.

Cette thèse porte sur l'évaluation des gains de productivité qui peuvent être attendus de la planification optimisée du transport forestier, en comparaison avec des pratiques non optimales. Notre approche se situe dans une projection dans un futur contexte de collaboration plus globale des acteurs logistiques, dans laquelle les marchés autant que moyens pourraient se trouver plus ou moins mutualisés dans une *supply-chain* du bois-forêt.

La thèse est organisée en cinq chapitres.

Le chapitre 1 fait l'analyse, issue de la littérature et de notre observation des pratiques, de l'état de l'art en logistique forestière. Pour structurer les connaissances, nous ferons la part des aspects génériques (concept de *supply chain*, modèles de routage, optimisation du transport), et des aspects sectoriels (chaîne de valeur forestière, transport du bois). Enfin, nous positionnerons notre sujet de thèse en référence à un cœur de publications du domaine.

Le chapitre 2 considère les contraintes-métier du transport forestier, dont certaines relèvent de la problématique générale du transport, tandis que d'autres sont spécifiques au secteur d'activité. Nous décrivons la filière forestière, plus particulièrement telle qu'elle se présente en Aquitaine, en explicitant les processus décisionnels suivis par les principaux acteurs. La prise en compte des principales spécificités sectorielles du transport forestier est en effet nécessaire pour permettre une formulation suffisamment réaliste du problème à résoudre et justifier la modélisation qui en est faite au chapitre 3.

L'objet des chapitres 3 et 4 est d'évaluer les gains de performance qui peuvent être attendus de modèles de planification optimisée, en intégrant les principales contraintes métier du transport forestier, et qui pourront être instanciés et appliqués à une classe importante d'entreprises du transport forestier, ou destinés à un décisionnaire logistique.

Plus particulièrement, le chapitre 3 présente nos modèles d'optimisation du transport forestier, en intégrant les pratiques industrielles et les contraintes métier citées dans le chapitre 2. Nous mettons en exergue les pistes d'amélioration que les gestionnaires de transport pourront suivre pour mieux exploiter les gisements de productivité qui s'offrent à eux.

Le chapitre 4 décrit l'application de nos modèles décisionnels aux données réelles fournies par une entreprise aquitaine de transport forestier. Nous établissons les performances issues du cas observé et les comparons avec les résultats de nos modèles d'optimisation appliqués aux mêmes données.

Enfin, le chapitre 5 met en perspective l'usage qui peut être fait de nos modèles de décision dans le cadre d'une organisation logistique collaborative, en vue d'exploiter plus largement les gisements de productivité offerts par l'élargissement du périmètre logistique soumis à optimisation. Par l'application de nos modèles à quelques cas d'école, nous montrons qu'un périmètre élargi d'optimisation tire profit d'une double intégration : l'intégration multi-acteurs, qui élargit l'assiette de la collaboration des acteurs, et l'intégration de processus, qui englobe les activités approvisionnement, coupe, et transport.

La conclusion générale récapitule les principaux résultats obtenus et présente les perspectives ouvertes par nos travaux de thèse.

Chapitre 1 : Analyse de l'état de l'art et positionnement de la thèse

1 Analyse de l'état de l'art et positionnement de la thèse

1.1 Introduction

La logistique forestière assure l'approvisionnement de la filière-bois, constituée par l'ensemble des entreprises de première et deuxième transformation du bois, ainsi que l'industrie du papier et du bois-énergie. Par ce premier chapitre, nous situons la problématique de la logistique forestière dans le contexte plus général des chaînes d'approvisionnement, telles qu'elles peuvent se présenter dans d'autres secteurs d'activité. L'état de l'art du domaine comporte donc à la fois des connaissances génériques sur l'organisation et le pilotage des chaînes logistiques et des connaissances-métier propres à la filière-bois. L'analyse de l'état de l'art et des publications nous permettra d'isoler la problématique d'optimisation du transport des lieux de coupe aux usines à approvisionner, pour laquelle les pratiques industrielles peuvent être améliorées. Nous positionnerons en conséquence notre sujet de thèse sur l'élaboration de modèles de pilotage pour l'amélioration de performance en transport du bois- forêt.

1.2 Chaînes d'approvisionnement (*Supply Chains*)

Une entreprise forme, avec ses fournisseurs, les fournisseurs de ses fournisseurs, ses sous-traitants, ses clients et les clients de ses clients, une chaîne logistique. Ce réseau permet de fabriquer des produits qui seront vendus aux clients finaux. Les acteurs de cette chaîne concourent ainsi à un processus d'approvisionnement d'une filière consommatrice de produits, ce qu'évoque le terme de *Supply Chain*. On parle de chaîne logistique collaborative dès lors qu'une alliance d'acteurs vise à obtenir des gains de performance : il y a collaboration quand deux entités, ou plus, forment une coalition et échangent ou partagent des ressources (incluant l'information), dans le but de prendre des décisions ou d'accomplir des activités qui généreront des profits qu'ils ne pourraient pas (ou seulement partiellement) générer individuellement (Audy et al, 2012). Dans ce contexte, les compagnies ont besoin de créer des relations d'affaires clés avec leurs fournisseurs, leurs distributeurs et leurs clients (Nagati et al, 2009), afin d'améliorer non seulement leur performance propre, mais aussi celle du processus global d'approvisionnement. Plusieurs formes de collaboration sont possibles (Barratt, 2004). Une collaboration verticale se produit entre des acteurs associés dans une même chaîne logistique. A contrario, on parle de collaboration horizontale lorsque des acteurs, éventuellement concurrents, peuvent fournir des biens ou des services complémentaires à une chaîne logistique, et ces deux formes de collaboration peuvent être combinées (Mason et al, 2007).

1.2.1 Conception des chaînes d'approvisionnement

L'étude rapportée dans Nagati et al (2009) analyse les bonnes pratiques de collaboration entre industriels et acteurs de la grande distribution en France, en s'appuyant sur trois cas: un grand distributeur et ses petits fournisseurs, un grossiste et ses clients, un distributeur et un industriel de grande taille. Cette étude montre qu'il n'existe pas de modèle idéal, ni de forme de collaboration universelle. En effet, tout type de relation collaborative peut satisfaire les partenaires, dans la mesure où il est bien adapté au contexte sectoriel, au produit et aux attentes des parties prenantes. Les enjeux de cette collaboration sont multiples : réduction des coûts, amélioration de la qualité, focalisation de l'entreprise sur ses compétences de base (*core business*), augmentation des profits ou réduction des délais. Cependant, selon Nagati et al (2009), on parle davantage de collaboration qu'on ne l'applique dans la réalité.

La pratique industrielle dispose de guides méthodologiques pour organiser la chaîne d'approvisionnement et aider les acteurs à mettre en place des solutions collaboratives. Ainsi, le modèle SCOR (*Supply Chain Operations Reference*), issu du *Supply Chain Council* créée en 1996 aux USA, standardise la représentation des flux dans une organisation logistique, et constitue un langage commun aux acteurs. ECR France (*Efficient Consumer Response*), association de distributeurs généralistes et spécialisés, a élaboré une plateforme offrant un langage commun de communication entre les acteurs de la chaîne d'approvisionnement (Labasse, 2012).

1.2.2 Planification de la chaîne logistique (*Supply Chain Management*)

Selon Porter (1982), la chaîne de valeur résulte d'activités spécifiques à travers lesquelles des entreprises créent une valeur ajoutée et ainsi obtiennent un avantage compétitif. Étant donné l'interaction de ces activités au sein de la chaîne, la façon dont une entreprise maîtrise l'une d'elles influence le coût ou la performance des autres activités.

Dans le cas d'entreprises fabriquant et distribuant des produits physiques, la chaîne de valeur peut être définie comme un réseau d'acteurs géographiquement dispersés où la matière première et les produits intermédiaires et finis sont acquis, transformés, entreposés ou vendus (Shapiro, 2007). Des liaisons de transport relient les installations et permettent la circulation des produits vers les clients finaux, qui font donc partie intégrante de la chaîne (Stadtler, 2005).

Selon Fleischmann (2008), une chaîne de valeur comporte quatre fonctions distribuées sur trois horizons temporels, dont la planification s'envisage à long, moyen et court terme (Figure 1.1). La mise en œuvre de chacune des quatre fonctions nécessite une planification propre, qui se base sur les prévisions de la demande, elles-mêmes intégrant l'analyse des historiques de vente. La dimension verticale représente le processus décisionnel de façon hiérarchique sur trois niveaux temporels : le long terme (niveau stratégique), le moyen

terme (niveau tactique) et le court terme (niveau opérationnel). Par principe, les décisions stratégiques deviennent des orientations pour les consignes tactiques, qui dirigent à leur tour les décisions opérationnelles (Meyr et al, 2008).

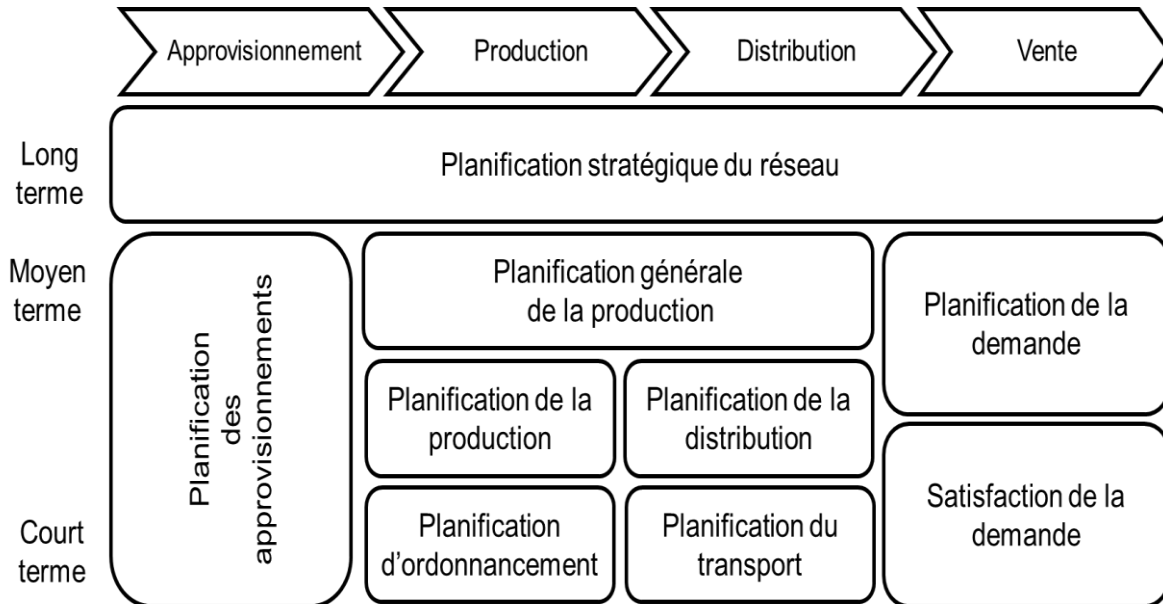


Figure 1.1: Planification de la chaîne de création de valeur (d'après Fleischmann, 2008)

Un réseau logistique est constitué de l'ensemble des ressources et processus impliqués dans une chaîne de création de valeur (Shapiro, 2007). Pour optimiser l'allocation des ressources et processus, il faut réaliser l'intégration du réseau logistique, c'est-à-dire déterminer « Qui fait quoi et comment ? » (D'Amours et al, 2003). Une telle intégration présente trois dimensions : i) l'intégration fonctionnelle relie les achats, la transformation/production, le transport, l'entreposage et la gestion des inventaires; ii) l'intégration spatiale relie les activités entre vendeurs, les installations et les marchés géographiquement dispersés (Savard, 2011); iii) enfin, on définit l'intégration inter-temporelle des activités à travers les horizons stratégique, tactique et opérationnel de planification (Shapiro, 2007).

1.2.3 Les problèmes de transport

Le transport réalise la transmission du flux physique entre les acteurs d'une chaîne logistique. En dépit de son caractère éminemment générique, le transport de marchandise répond d'abord à une typologie basée sur la diversité des points de collecte et de livraison.

Le problème de transport de type *multidrop*, très commun, consiste, à partir d'un même lieu de chargement, à livrer par un même véhicule des marchandises destinées à plusieurs points de livraison géographiquement proches ou situés sur un même itinéraire. A contrario, le problème de transport de type *multipick* consiste à collecter en plusieurs points d'expédition des marchandises destinées à un même lieu de livraison. Dans les

deux cas, la performance recherchée combine la qualité de service (respect des délais de livraison) et la productivité (minimisation du kilométrage global de la flotte de camions utilisée) sous des contraintes légales (temps de conduite, réglementations d'itinéraires et de charge maximale) et commerciales (horaires de livraison).

La littérature scientifique fait ressortir de nombreux problèmes de transport, chacun modélisé sous une forme standard se prêtant aux approches mathématiques d'optimisation. Le problème de routage de véhicules (*Vehicle Routing Problem*, VRP), le problème du voyageur de commerce (*Traveling Salesman Problem*, TSP) et le problème du postier chinois (*Chinese Postman Problem*, CPP), dans lesquels un ou plusieurs véhicules doivent livrer des marchandises à des clients en parcourant un réseau de transport sont des classiques d'optimisation combinatoire.

La formulation mathématique du problème de transport est, au minimum, un modèle de flot à trois indices (origine, destination et véhicule) dont on trouve de nombreuses variations (Ben Ismail et al, 2011; Gourgand et al, 2012).

Une expression générale du problème de transport est le Capacitated VRP (CVRP), qui est le VRP avec contraintes de capacité des véhicules. L'idée est qu'une flotte de véhicules de capacité finie, initialement basée dans un dépôt, doit réaliser des tournées de livraison chez plusieurs clients. L'itinéraire de livraison réalisé par un même véhicule constitue une tournée. Chaque client doit être desservi une et une seule fois et chaque tournée commence et se termine au dépôt. L'objectif est de minimiser un coût total, somme des distances ou des temps de parcours des tournées.

La prise en compte de règles et contraintes spécifiques induit des variantes du VRPC (Figure 1.2).

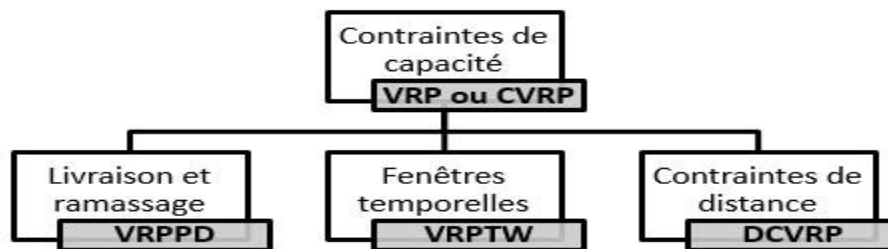


Figure 1.2: Variantes du VRP de base, adapté de (Ben Ismail et al, 2011)

Le VRPPD (VRP with *Pick-up and Deliveries*) prend en compte les temps de chargement (*Pick-up*) et de livraison (*Delivery*). Cette variante induit une difficulté supplémentaire, car le modèle doit suivre l'évolution de la charge des camions durant leur tournée.

Le VRPTW (*VRP with Time Windows*) prend en compte les contraintes d'horaire d'ouverture (fenêtres temporelles) du site de livraison propre à chaque client (Cherkesly et al, 2014). Ces contraintes peuvent être dures ou souples. Dans le cas de contraintes dures, l'arrivée d'un véhicule avant la fenêtre temporelle impose une attente, et les retards sont interdits. A contrario, des contraintes souples d'ouverture ont un caractère simplement incitatif.

Le DCVRP (*Distance-Constrained VRP*) prend en compte une contrainte de distance maximale parcourue par véhicule sur une période donnée.

Diverses formulations de contraintes donnent lieu à une variété d'énoncés de problèmes de transport. Citons le VRPPDTW (*VRP with Pick-up and Deliveries and Time Windows*), le Periodic VRP à livraisons périodiques, le Split Delivery VRP assurant la livraison d'un même client par plusieurs véhicules, le Multiple Depot VRP. Les modèles sont généralement déterministes (Programmation Linéaire, Quadratique, Approche par Contraintes, Programmation Dynamique), plus rarement probabilistes (*Stochastic VRP*). Pour une revue détaillée de ces variantes, on pourra se référer à (Caceres et al, 2015).

Notons que le frein à la résolution des problèmes de transport complexes (de par la dimension du réseau, le nombre de véhicules et les contraintes spécifiques) ne se situe pas tant au niveau de la solution théorique du problème combinatoire qu'au niveau du temps de calcul engendré par l'explosion combinatoire. D'où l'intérêt de chercheurs pour la production d'heuristiques produisant des solutions sous-optimales en un temps raisonnable (Caceres et al, 2015).

1.3 Chaîne d'approvisionnement du secteur bois-forêt

Dans cette section, nous résumons les connaissances sur la chaîne d'approvisionnement dans le secteur forestier, telles qu'elles apparaissent dans la littérature scientifique.

1.3.1 Chaîne de création de valeur de la filière-bois

La chaîne de création de valeur dans la filière bois implique divers acteurs, intervenant dans la sylviculture, l'entretien et l'exploitation des forêts, l'approvisionnement, les premières et deuxième transformations, la distribution, le service après-vente, voire la récupération et le recyclage des produits usagés. L'ensemble de ces intervenants et leurs interactions définissent la chaîne de valeur (D'amours et al, 2009) de la filière.

La création de la valeur est assurée par le processus de transformation de la ressource-bois et par la planification des activités qui vise à garantir la productivité des moyens et la satisfaction des clients. La Figure 1.3, issue de (D'amours et al, 2009), illustre de façon schématique le processus de création de valeur dans l'industrie des produits forestiers, qui comprend plusieurs sous-chaînes : pâtes et papiers, bois d'œuvre et

bioénergie. Ces chaînes sont fortement interdépendantes, non seulement parce que celles-ci se nourrissent d'intrants communs (notamment, billes de bois), mais aussi parce que certaines transformations engendrent des sous-produits (écorces, copeaux) utilisés dans d'autres sous-chaînes de la filière-bois.

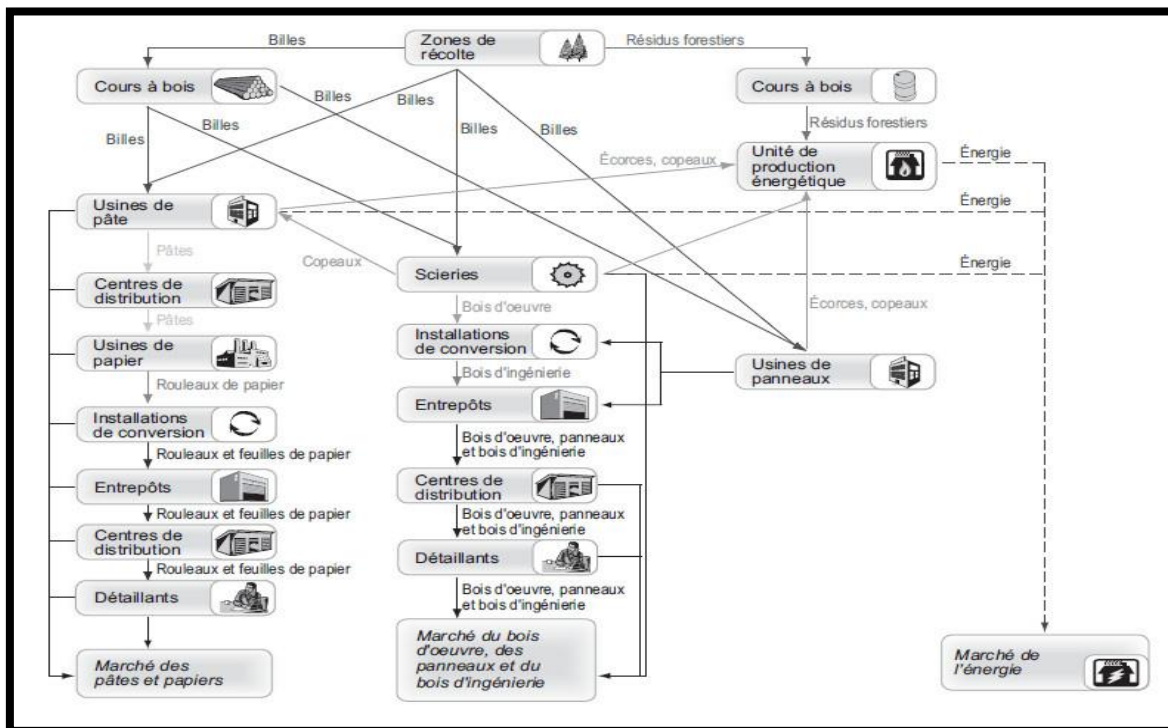


Figure 1.3: Chaînes de valeur de la filière-bois, d'après (D'amours et al, 2009)

La chaîne de valeur de la filière-bois se différencie de la plupart des autres secteurs industriels par deux caractéristiques principales :

- d'une part, les processus de transformation sont divergents, de sorte que des modifications de procédés sur une chaîne de valeur peuvent interférer avec la productivité d'autres chaînes, de même qu'une augmentation de la consommation d'une chaîne peut déséquilibrer l'approvisionnement d'autres chaînes. Notamment, la forte expansion actuelle de la filière bois-énergie ne peut être alimentée par les seuls résidus forestiers et nécessite de ponctionner du bois (par ex. billes) alimentant les autres chaînes. Au Québec, le réseau de création de valeur est fortement divergent, orienté vers l'innovation et organisé pour produire des produits spécialisés, transformés au niveau régional pour le marché mondial, en assurant la coordination et l'intégration de ses différents flux de processus (Lebel, 2010).

- d'autre part, la portée de la chaîne est particulièrement importante, depuis la gestion du bois sur pied, l'approvisionnement en bois des unités de transformation, jusqu'à l'organisation des réseaux routiers en forêt, la localisation des usines, et la localisation des marchés (Uusitalo, 2005).

Dans la partie amont de la filière-bois se trouve la chaîne de valeur de la forêt, composée de l'aménagement forestier et des opérations forestières. Il est nécessaire de planifier les peuplements des forêts, ainsi que les opérations de voirie qui permettront d'y avoir accès. Suite à l'abattage des arbres, les tiges sont débardées, tronçonnées, puis chargées sur des camions afin d'être transportées de la forêt vers les usines de sciage (Lebel et al, 2009). Dans la chaîne d'approvisionnement forestière, il existe deux principaux procédés de récolte (Akay et al, 2006) : en arbre entier ou en bois tronçonné. Le flux de produit varie selon la méthode utilisée. Pour la méthode en arbre entier, les arbres sont abattus, ébranchés, puis débardés sur la zone de transit en bord de route. Là, ils sont triés selon les caractéristiques du bois, puis empilés pour le transport du bois en longueur. Les branches et les houppiers sont alors disponibles en bord de route comme biomasse. Les tiges sont tronçonnées en usine ou au parc de transfert. Pour le procédé en bois tronçonné, les arbres sont abattus, ébranchés et tronçonnés sur le lieu d'abattage. Dans le système en arbres entiers, des débusqueuses sont utilisées pour transporter les grumes, alors que, dans l'autre système, le débardage repose sur des porteurs pour transporter les billes. Les produits transportés sont classifiés, en amont et en aval, selon plusieurs critères : l'essence, la qualité, le diamètre et la longueur (Jordan, 2012). Ces produits sont quantifiés selon différentes unités de mesure.

Quant à la valeur ajoutée en transformation (bois d'œuvre, panneaux et bois énergie), celle-ci est mise en œuvre par des activités variées, qui peuvent impliquer un seul acteur ou impliquer différentes compagnies (Gaudreault et al, 2009).

En définitive, la cartographie de la chaîne de valeur montre divers acteurs répartis selon trois classes principales : les producteurs (sylviculteurs et exploitants forestiers), les prestataires de service (transporteurs, entreprises de travaux forestiers) et les consommateurs (scieries, papeteries, unités de bois-énergie).

1.3.2 *Supply Chain* du secteur bois-forêt

Nous nous intéressons ici aux activités de la chaîne de valeur portant spécifiquement sur l'approvisionnement et le transport du bois entre les acteurs d'une chaîne de valeur dans la filière bois. Une analyse des relations entre acteurs de la filière pâte à papier est rapportée dans Lehoux et al (2007). L'objectif était d'évaluer les profits des acteurs selon le niveau de collaboration entre ces acteurs :

- système traditionnel sans collaboration
- réapprovisionnement continu (CR)

- gestion des stocks par le fournisseur (VMI)
- collaboration dans la planification, les prévisions et le réapprovisionnement (CPFR)

Selon cette étude, l'approche CPFR procure le plus grand profit aux acteurs grâce à l'optimisation des coûts de transport et du stockage. L'approche VMI arrive en deuxième position, avec une réduction des coûts de transport. L'approche CR et le système traditionnel ont donné le profit le plus bas pour tout le réseau. Des résultats similaires ont été démontrés par Elleuch et al, (2012).

L'organisation de l'information entre les acteurs est déterminante dans l'efficacité de la collaboration. Une information asymétrique ou mal partagée peut entraîner des dysfonctionnements, comme l'effet de coup de fouet, ou Bullwhip Effect (Lee et al, 2004), aussi connu sous le nom d'effet Forrester. Les acteurs doivent en effet partager l'information qui leur permettra d'anticiper leurs décisions de planification, avec un impact positif sur la performance réseau de création de valeur.

D'où la nécessité de standards de communication entre les acteurs de la Supply Chain. Dans l'industrie des produits forestiers, citons le standard global de communication PapiNet (Chituc et al, 2008). Le but est de s'entendre sur la définition des données et des formats des transactions entre acteurs.

VTM (Virtual Transportation Manager) est un outil de gestion collaborative de transport forestier élaboré par le FORAC à Québec (Audy et al, 2007), ayant pour objectifs de :

- Réduire les coûts de transport par un meilleur routage et une meilleure utilisation des véhicules
- Réduire l'émission de gaz à effet de serre
- Contrôler et visualiser les inventaires de fibre
- Réduire le temps de réponse pour prendre des décisions
- Favoriser l'intégration et le partage des besoins et des offres de transport et fournir un système convivial aux chauffeurs.

Cet outil assure la répartition des camions sur une base régionale en utilisant l'internet (Marier et al, 2007). VTM est un support centralisé, offrant plusieurs solutions de collaboration à usage des clients ou des chauffeurs (utilisations de parcs de transfert, remorques multi-usages, voyages mixtes ou multi-produits). Cependant, ce système n'a pas été déployé, car il nécessite une entente commerciale pour son exploitation.

En Aquitaine, plusieurs suites de projets ont développé des solutions d'aide à la décision et de planification du transport (Arraiolos et al, 2011) couvrant les aspects d'optimisation de la chaîne de valeur, mais aussi les standards de communication et la traçabilité du flux matière (Figure 1.4).

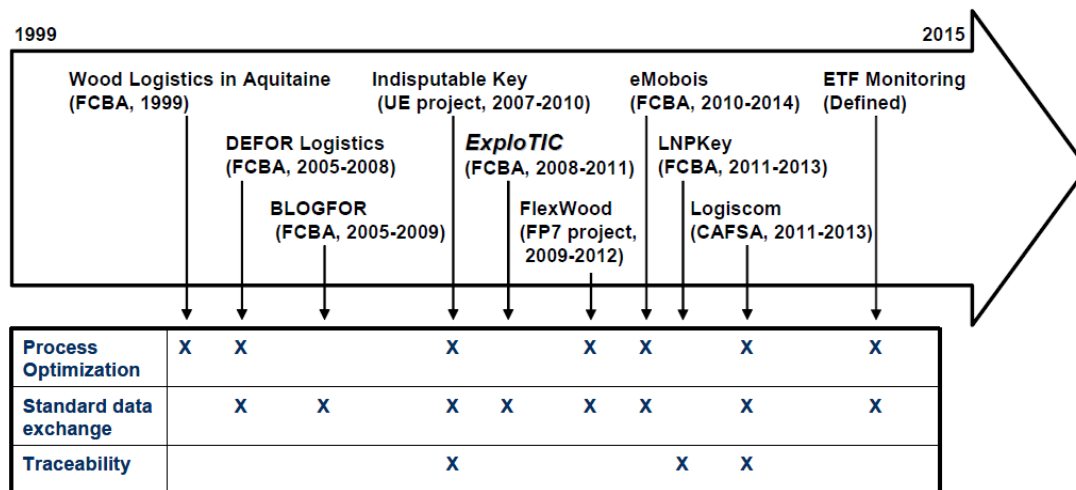


Figure 1.4: Projets R&D de logistique forestière en Aquitaine, d'après (Arraiolos et al, 2011)

Il peut être intéressant d'organiser une chaîne d'approvisionnement autour de nœuds de transstockage, ou Cross-docking, de produits, matérialisés par des parcs de transfert (Vogt, 2010). Fonctionnant sur un mode semblable, des cours de triage à bois peuvent être aménagées en forêt ou sur des sites situés entre les forêts et les sites d'utilisation (Lehoux et al, 2012). L'avantage du «Cross-docking» est de raccourcir le délai d'approvisionnement des unités consommatrices. En contrepartie, la nécessité du transbordement complexifie la planification et crée des ruptures de charge qui grèvent la productivité.

Les *supply chains* de la filière bois-forêt peuvent combiner plusieurs modes de transport (routier, ferroviaire et maritime). Dans un cas d'étude suédois (Forsburg et al, 2005), une planification logistique au niveau stratégique et tactique combine route et rail. On trouve dans (Nørstebø et al, 2013) une analyse de l'opportunité de combiner transport maritime et transport routier dans un cas d'étude norvégien. L'avantage d'un transport multimodal est d'améliorer la qualité de service. En contrepartie, cela nécessite divers moyens de transport et une certaine coordination entre ces moyens.

1.3.3 Transport du bois-forêt

Dans l'industrie forestière, le transport assure l'acheminement de volumes de bois depuis des sources situées en forêt vers des sites industriels consommateurs de fibre (Audy et al, 2012). Il s'agit d'une problématique de transport de type *Pickup/Delivery Problem* (PDP) (Marier et al, 2007), dont il faut minimiser les coûts logistiques (Rönqvist, 2003). Plus globalement, l'objectif peut s'appréhender sous l'angle économique et environnemental (chaîne logistique verte), dans le but de limiter l'émission de gaz à effet de serre (Naud et al, 2012, Laurent et al, 2013). Pour déplacer les produits de la forêt aux différentes unités consommatrices, plusieurs moyens de transport sont possibles (route, rail et eau) et beaucoup d'équipements sont nécessaires, selon la forme sous laquelle le produit du bois est transporté (Bourcet et al, 2008). Par ailleurs, l'unité de mesure utilisée pour

quantifier le flux varie d'un produit à l'autre. On peut ainsi quantifier les produits en tonne, tonne sèche, en stère, en mètre cube, mètre cube apparent, mètre cube sous-écorce... L'utilisation des bons facteurs de conversion tout au long de la chaîne devient particulièrement important.

La littérature montre que la mutualisation de moyens entre transporteurs s'avère profitable à la fois d'un point de vue économique et environnemental (Epstein et al, 2007), bien que fort complexe à déployer (Frisk et al, 2010). Une organisation collaborative du transport entre plusieurs acteurs industriels et / ou distributeurs, coordonnée, le cas échéant, par un prestataire logistique, permet d'améliorer le taux de remplissage du matériel roulant. Ceci présuppose une collaboration permettant de partager le planning de chargement et de livraison (Labasse, 2012).

Chaque processus d'affaire implique des décisions de planification spécifiques (quoi, quand et comment) qui peuvent être mise en œuvre dans une perspective à court ou à long terme (Lehoux et al, 2009b). Par exemple, un plan de livraison ou la mise à jour d'une prévision peut être exécuté(e) en une semaine, alors que le choix et la mise en œuvre d'une stratégie peuvent nécessiter quelques mois, voire des années. Dans le secteur forestier, les approches de planification hiérarchique sont pertinentes (Lebel et al, 2009) et les décisions de planification sont généralement de trois ordres : stratégique, tactique et opérationnel (Lehoux et al, 2012). Le niveau stratégique organise les relations entre les différents acteurs de la chaîne, alors que les problèmes de planification proprement dits concernent les questions de production/distribution. La planification tactique (Morneau-Peirera et al, 2013) s'occupe normalement des règles d'allocation qui définissent l'unité ou le groupe d'unités responsable de l'exécution des différentes opérations du réseau, ou quelle ressource ou quel groupe de ressources sera utilisée. Cependant, la problématique opérationnelle (Murphy, 2003) est de savoir comment mouvoir le produit efficacement dans les canaux logistiques planifiés.

1.4 Synthèse bibliographique

L'analyse de l'état de l'art (littérature scientifique, projets pilotes) fait apparaître des connaissances générales du domaine *Supply Chain Management*, ainsi que des connaissances spécifiques au secteur bois-forêt.

Les aspects génériques, présentés dans la section 1.2, adressent de nombreuses questions qui ont été classifiées par SCMIP (François 2007) selon différents critères : niveau de décision, processus fonctionnel, vues, structure de chaîne, nature des modèles de planification, méthode de résolution, outils disponibles (Tableau 1.1). Les cases grisées correspondent au positionnement de ma thèse (cf. §1.5).

Tableau 1.1: Domaine Supply Chain, adapté de (François, 2007)

Critère	Valeurs envisageables par le critère					
	Niveau de décision	Stratégique	Tactique	Opérationnel	Temps réel	
Processus	Approvisionnement	Production	Distribution	Vente	Logistique inverse	
Vue	Conception de la chaîne	Planification des activités	Gestion des stocks	Gestion de transport	Gestion des risques	Évaluation de performance
	Système d'information	Modélisation d'entreprise	Collaboration	Aspects sociaux	Aspects économique et financier	
Structure de la chaîne	Dyadique	Convergente	Divergente	Série	Réseau	
Nature du modèle	Analytique	Simulation	Descriptif	Centralisé	Distribué	
Caractéristique du modèle	Déterministe	Stochastique	Continu	Discret	Linéaire	Non linéaire
Méthode de résolution	Programmation Mathématique	Heuristique	Approche par contraintes	Théorie des jeux	Simulation continue	Simulation discrète
Outils	Logiciel non dédié	Logiciel spécifique	Simulateur	Solveur Générique (CPLEX)		

Par ailleurs, la littérature sectorielle, présentée dans la section 1.3, émane d'une communauté scientifique restreinte et ciblée sur les chaînes d'approvisionnement du bois. Les principales références sont présentées dans le Tableau 1.2 selon la problématique ciblée, la technique de résolution employée et le domaine d'application.

Tableau 1.2 : Principales références en logistique bois-forêt

Références	Problématique	Techniques/méthodologies	Domaine d'application
(Laurent et al, 2013)	Transport	MIP, optimisation multi-objectifs	Foresterie, Québec
(D'Amours et al, 2013)	Transport, collaboration	Théorie des jeux	Foresterie, Suède
(Morneau-Peirera et al, (2013)	Production (forêt-usine)	Programmation mathématique et simulation	Foresterie
(Marier et al, 2013)	Transport	Méthode hybride avec CP et heuristique	Foresterie, Québec
(Lehoux et al, 2012)	Chaîne d'approvisionnement	Revue littérature	Foresterie, Canada
(Flisberg et al, 2012)	Transport collaboratif	Programmation mathématique	Foresterie, Suède
(Audy et al, 2012b)	Transport	Revue littérature	Foresterie
(Audy et al, 2012)	Logistique collaborative	Théorie des jeux, étude de cas	Foresterie
(Jordan et al, 2012)	Transport	Étude comparative (France, Suisse)	Foresterie
(Elleuch et al, 2012)	Production	Programmation mathématique et simulation	Foresterie, Québec
(Azouzi et al, 2012)	Chaîne d'approvisionnement	Étude de cas, étude descriptive	Foresterie, Québec
(Mohsen et al, 2011)	Production (forêt-usine)	MIP (Mixed Integer Programming), Simulation	Foresterie, Québec
(Naud Marie et al, 2012)	Collaboration	Modèle conceptuel, optimisation multi-objectifs	Foresterie, Canada
(Arraiolos et al, 2011)	Collaboration	Technologie TIC	Foresterie, France

(Vuillermoz et al, 2011)	Chaîne d'approvisionnement	Cartographie	Foresterie, France
(Bigot, 2010)	Production (forêt)	Étude descriptive	Foresterie, France
(Lebel et al, 2010)	Chaîne d'approvisionnement (opérations forestières)	Étude descriptive	Foresterie, Québec
(Frisk et al, 2010)	Transport collaboratif	Programmation mathématique	Foresterie, Suède
(Gaudeault et al, 2009)	Production (usine)	Programmation mathématique	Foresterie
(Nagati et al, 2009)	Logistique (approvisionnement et transport)	Étude comparative (bonnes pratiques collaboratives)	Alimentaire, France
(Lebel et al, 2009)	Chaîne d'approvisionnement (production forêt et transport)	Étude descriptive (Revue littérature)	Foresterie, Québec
(Bourcet et al, 2008)	Transport	Étude descriptive	Foresterie, France
(Le Net et al, 2007)	Transport	Étude comparative	Foresterie, (France et Allemagne Suède, Royaume –Uni)
(Gingras, 2007)	Transport	Heuristiques	Foresterie, Québec
(Audy et al, 2007)	Transport	Plate-forme VTM	Foresterie
(Lehoux et al, 2007)	Logistique	Programmation mathématique, étude comparative	Foresterie
(François, 2007)	Chaîne d'approvisionnement (production, stockage et transport)	Programmation mathématique (<i>Xpress MP</i>)	Générique
(Marier et al, 2007)	Transport collaboratif	Étude descriptive (plateforme <i>VTM</i>)	Foresterie
(Forsburg et al, 2005)	Transport collaboratif	Programmation mathématique	Foresterie, Suède
(Rönnqvist, 2003)	Transport	Programmation mathématique	Foresterie

Une revue du domaine de recherche (Audy et al, 2012), issue du CIRRELT, répertorie les différentes approches et modèles de planification du transport du bois, qui sont des adaptations du PDP (*Pick-up and Delivery Problem*) au contexte forestier. Les approches relèvent généralement d'une vision statique du problème de planification (données disponibles préalablement au calcul du plan), les approches de planification dynamique restant assez rares (Par exemple, Rönnqvist et al, 1998). Par ailleurs, la formulation du problème est généralement déterministe; plus rarement, le caractère incertain de certaines données (temps de transport, niveaux de stocks, demandes) conduit à une formulation stochastique (Berbeglia et al, 2007).

Face à la complexité du problème de calcul des tournées, certains auteurs décomposent le problème en une séquence de décisions plus simples. Dans (Audy et al, 2011), une décision en trois phases permet, partant de la génération d'un ensemble large de routes réalisables en une journée de travail d'un chauffeur, de produire ensuite une distribution de routes par chauffeur, compatibles avec la demande de la semaine, pour enfin produire les tournées journalières par une technique de Programmation par Contraintes. Dans (Hirsch, 2011), on alloue les stocks aux clients sous contrainte de capacité des transporteurs, puis on procède à un lissage de charge, pour enfin déterminer les tournées en résolvant un VRP. Dans (El Hachemi et al, 2015), un modèle LP affecte les points de chargement/déchargement aux camions, tandis qu'une deuxième phase optimise le routage des camions.

Dans l'ensemble des questions ouvertes mises en avant dans (Rönnqvist et al, 2015), la nécessité de lier les décisions de niveau stratégique, tactique et opérationnelle est présentée comme l'un des challenges du secteur d'activité. C'est la question de la planification hiérarchique, qui doit assurer que les décisions d'un niveau engendrent des solutions faisables au niveau suivant, et, réciproquement, que les décisions d'un niveau soient cohérentes avec les décisions du niveau précédent. Cette question est corrélée avec la nécessité d'un modèle d'agrégation/désagrégation des données d'un niveau décisionnel à l'autre, notamment concernant les charges et les capacités de transport en unités abstraites.

La planification stratégique (Forsberg et al, 2005; McNaughton et al, 1999), s'effectue habituellement sur une base annuelle, où les gestionnaires cherchent à satisfaire la demande annuelle des scieries et usines de pâtes à papier, par des volumes disponibles provenant de différentes sources d'approvisionnement.

La planification tactique (Carlsson et Rönnqvist, 2007), s'étend sur une période de quelques mois à une semaine, et assigne les différentes sources d'approvisionnement retenues aux usines concernées. Ce problème peut être formulé de manière exacte par programmation linéaire impliquant des flux directs entre des points d'origine et de destination. Cependant, de meilleures solutions peuvent être obtenues en offrant des possibilités de retour en charge. Dans ce contexte, « retour en charge » signifie que le camion transporte une charge lorsqu'il retourne de sa destination vers son premier point d'origine (Carlsson et Rönnqvist, 2007).

Enfin, la planification opérationnelle (Andersson et al, 2008), intègre, selon les plans stratégique et tactique établis au préalable, le routage et l'ordonnancement de chacun des camions d'une flotte.

Pour maîtriser la combinatoire des modèles, (Carlsson et Rönnqvist, 2007) décrivent une heuristique de résolution par génération des colonnes avec sous-problème du plus court chemin pour intégrer les retours en charge. Dans le même esprit, (Rix et al, 2015) proposent une variante de génération de colonnes pour résoudre le problème d'optimisation opérationnelle en un temps raisonnable.

Les travaux de Rönnqvist, qui font autorité en matière de logistique forestière, se sont concrétisés en solutions informatiques, appliquées à des cas industriels, pour la résolution du problème de planification à différents niveaux :

- FlowOpt pour la planification stratégique et tactique : (Forsberg et al, 2005), (Carlsson et Rönnqvist, 2007), (Frisk et al, 2010),
- RuttOpt pour la planification opérationnelle du routage : (Flisberg et al, 2009), (Andersson et al, 2008),
- ÅkarWeb, pour la planification opérationnelle du routage avec retour en charge, (Eriksson et Rönnqvist, 2003).

Dans l'ensemble des problèmes ouverts de recherche formulés récemment par (Rönnqvist et al, 2015), notre recherche s'est concentrée sur le lien entre les niveaux décisionnels tactique et opérationnelle :

- Comment implémenter des modèles de décision cohérents dans un cadre de planification hiérarchique ?
- Comment développer des mécanismes d'agrégation/désagrégation pour la planification hiérarchique ?
- Comment concevoir les mécanismes de coordination nécessaires pour intégrer et synchroniser les acteurs d'une chaîne de valeur forestière ?

1.5 Positionnement et objectifs de la thèse

Au vu de l'état de l'art en modélisation et optimisation de la chaîne d'approvisionnement de la filière-bois, nous avons positionné notre recherche sur l'articulation des décisions tactique et opérationnelle dans la planification du transport forestier. En effet, au plan théorique, il nous est apparu une carence méthodologique dans le raisonnement qui relie, au niveau tactique, le besoin d'évaluer un plan de charge sur le moyen terme, pour en déduire les ressources de transport nécessaires et procéder à leur réservation (en interne ou via une sous-traitance) et, au niveau opérationnel, le besoin d'optimiser les tournées journalières des flottes de camions. Cette articulation est essentielle pour assurer une bonne productivité du transport, dont le coût représente une part importante des coûts logistiques. En outre, les pratiques industrielles du transport forestier, notamment s'agissant de PME, sont souvent décidées au jour le jour, c'est-à-dire au niveau opérationnel, sans cadre tactique explicite.

Nous avons extrait de l'état de l'art un cœur de publications scientifiques (Tableau 1.3) portant sur la problématique de planification du transport forestier dans une approche globale des chaînes logistiques. Pour ces travaux de référence, nous avons relevé plusieurs caractéristiques :

- Le contexte stratégique abordé, qui met en scène divers scénarios de partenariat et différents segments de la chaîne logistique (transport amont : de la forêt aux usines consommatrices, transport aval : entre acteurs de transformation du bois) ainsi que les modalités de partage d'activité entre partenaires,
- Le modèle décisionnel proposé, qui a vocation à s'intégrer dans un DSS (*Decision Support System*), pour l'aide à la planification des activités. Nous distinguons le type de PDP (*Pickup Delivery Problem*) traité, le niveau de planification (tactique et/ou opérationnel), avec ou sans contrainte de capacité de transport, et l'approche de résolution (Programmation Linéaire, Programmation en nombres mixtes, heuristiques),
- L'applicabilité du modèle à l'échelle industrielle, validée par un cas d'étude grandeur nature.

Vis-à-vis de ces références, nous positionnons notre thèse par similitudes et différences :

Similitudes

Nous nous inscrivons dans une approche de planification des activités à deux niveaux, tactique et opérationnel aux fins d'optimisation conjointe des allocations des sources aux clients et d'ordonnancement des tournées dans un problème de transport de type many to many (*multipick et multidrop*) avec *backhaul*.

Nous modélisons le problème de transport multi-produit, limité toutefois à deux produits dans le cas d'application industrielle issue de la région d'Aquitaine.

Le partage d'activité entre partenaires d'une coalition logistique, bien que non traité en tant que tel par notre niveau décisionnel, est pris en compte dans l'élaboration de notre modèle à deux niveaux : i) le niveau tactique définit un plan de charge global sans préjuger du partenariat, ii) les modalités de partage d'activité pourront être prises en compte au moment de la conversion du plan tactique global en plans opérationnels pour les acteurs.

Nous utilisons des modèles d'optimisation exacte (programmation linéaire en variables mixtes continues et binaires) de manière à pouvoir utiliser un solveur du marché (CPLEX d'IBM),

L'applicabilité industrielle de nos modèles a été vérifiée par le traitement d'un cas réel, de complexité significative.

Différences

Notre approche développe spécifiquement une hiérarchisation du processus d'optimisation logistique :

- le passage du niveau tactique au niveau opérationnel s'accompagne d'un changement de niveau d'abstraction. Ceci confère au raisonnement de niveau tactique un caractère fonctionnel générique, sans préjuger des modalités spécifiques de mise en œuvre opérationnelle des activités (partenariats, externalisation),
- une virtualisation des moyens de transport pour le raisonnement tactique par une image agrégée des moyens de transport accessibles. Ceci nous permet de réaliser une optimisation logistique au niveau tactique sous contrainte de capacité de transport,
- une relation explicite d'agrégation/désagrégation des capacités de transport entre les niveaux de décision tactique et opérationnelle. Ceci pour permettre i) d'estimer les capacités agrégées de manière réaliste par une interprétation préalable des moyens physiques (capacité des flottes accessibles), ii) d'engendrer des plans tactiques réalisables au niveau opérationnel.
- une fonction objectif exprimant une activité de transport (déplacement du bois en tonnes x km) au niveau tactique, plutôt qu'un coût économique, de manière à nous concentrer sur le taux d'exploitation des capacités de transport en nous affranchissant du biais induit par les modèles de coûts.

Tableau 1.3: Positionnement de la thèse

Référence	Contexte stratégique			DSS : Système support à la décision			Applicabilité à l'échelle industrielle
	Domaine d'étude	Type de partenariat	Modèle de partage d'activité	Planification tactique	Planification opérationnelle	Approche de résolution	
(Rix et al, 2014)	Transport amont Multi-produits	Optimisation mono-entreprise	Non	Gestion des approvisionnements		LP/ Programmation Dynamique Coût minimal	Cas d'étude Canadien
(Audy et al, 2012)	Transport amont Multi-produits	Pilotage varie d'un modèle d'affaire à l'autre	Oui	Allocation sans contraintes de capacité de transport	-	MIP Coût minimal	Cas d'étude Canadien
(Lehoux et al, 2009)	Approvisionnement et transport aval multi-produits	Partenariat d'une papeterie avec son client sous forme (VMI, CPFR et CR)	Oui	Gestion des approvisionnements		MIP Coût minimal	Cas d'étude Canadien
(Audy et D'amours 2008)	Approvisionnement et transport aval Multi-produits	Coalition de 4 fournisseurs de meuble dont un fournisseur pilote	Oui	Gestion des approvisionnements		Heuristique Coût minimal	Cas d'étude Canadien
(Marier et al, 2007)	Transport amont Multi-produits	Pilotage 3PL d'un ensemble de transporteurs de bois, pour 50 sources et 8 clients	Non	-	Routage et possibilité de <i>backhaul</i> avec contraintes de capacité physique de transport	Méthode hybride avec CP et heuristique Coût minimal	Cas d'étude Canadien
(Forsberg et al, 2005)	Transport amont Multi-produits	Pilotage 3PL de 8 entreprises forestières qui partagent leurs stocks	Oui	Allocation et backhaul sans contraintes de capacité de transport	-	LP Coût minimal	Cas d'étude Suédois
Thèse K. Moad	Transport amont Multi-produits	- Optimisation tactique et opérationnelle mono-acteur	Non	Allocation, <i>backhaul</i> avec contraintes de capacité de transport agrégée	Routage et possibilité de <i>backhaul</i> avec contraintes de capacité physique de transport	MIP Activité minimale	Cas d'étude Français
		- Scénarios collaboratifs à deux acteurs	Oui	Agrégation/désagrégation de capacité de transport			

Les objectifs qui ont orienté nos travaux sont présentés ci-après.

Objectif général de la thèse

Le programme de recherche s'articule autour de l'objectif général suivant : proposer un schéma décisionnel qui minimise les coûts de transport au bénéfice des acteurs (exploitants forestiers, transporteurs, clients). La proposition d'un tel modèle doit répondre aux contraintes-métier du contexte forestier, et offrir des performances supérieures aux pratiques actuelles, dans la perspective d'abaissement des coûts ou, à coût égal, d'augmentation du bassin d'approvisionnement.

La prise en compte conjointe des niveaux tactique et opérationnel vise à permettre une organisation des activités sur le moyen terme et une évaluation des moyens devant conduire à une bonne exploitation des ressources de transport.

Notre recherche s'est concentrée sur l'élaboration de modèles décisionnels qui puissent s'accommoder des variantes organisationnelles de la chaîne d'approvisionnement et de la dimension collaborative plus ou moins prononcée entre ses acteurs.

Objectif spécifique 1 : Ajuster activité et capacité de transport sur le moyen terme

Au niveau tactique, les décisions d'approvisionnement doivent être adaptées à la demande (essence, grade, dimension, volume et échéances) et à la localisation des usines. L'enjeu consiste à minimiser les déplacements globaux de bois par une affectation optimale des sources d'approvisionnements aux usines (Mohsen et al, 2011) et à planifier les volumes à déplacer, sans préjuger des modalités de transport (prestataires transporteurs, dimension des flottes, routage).

L'optimisation du plan de charge tactique permettra de mettre en œuvre des politiques de gestion (lissage de charge vs minimisation des délais), et d'identifier les marges de capacité ou les besoins de sous-traitance.

Objectif spécifique 2 : Optimiser les tournées

Au plan opérationnel, on répartit vers les acteurs (en fonction de l'organisation partenariale en présence) les consignes de transport issues du plan tactique global préalablement établi. L'enjeu est alors de minimiser le coût des déplacements des camions, en évitant de trop nombreux trajets à vide et en assurant le meilleur remplissage des camions. A titre d'exemple, un cas d'étude mené pour la région de la Mauricie (Marier et al, 2013) permet d'estimer à 2,9 % la diminution des distances parcourues si on exploitait les possibilités de retour en charge.

Objectif spécifique 3 : Préparer le pilotage des SCM dans la filière bois

Notre recherche, bien que spécifiquement centrée sur le pilotage tactique et opérationnel du transport du bois, n'ignore pas l'inévitable mise en place d'organisations collaboratives dans ce secteur, déjà envisagée depuis

longtemps (D'Amours et al, 2003), mais qui tarde à devenir commune. Dans cette perspective, nos modèles de décision tactique et opérationnelle du transport ne doivent préjuger ni de l'assiette des activités à organiser, ni du nombre des prestataires de transport, ni de l'auteur des décisions, toutes ces hypothèses pouvant être déclinées de diverses manières, en fonction de l'organisation logistique à piloter, qu'il s'agisse d'une organisation Peer-to-Peer avec gestion privative des ressources de transport, ou a contrario d'une forme partenariale avancée, mutualisant marchés et ressources.

C'est pourquoi nous chercherons dans cette thèse à valoriser la stratégie partenariale en montrant que les gains de productivité qui peuvent être escomptés d'une optimisation tactique et opérationnelle des activités de transport sont d'autant plus importants que l'assiette des activités et que le périmètre du partenariat sont larges.

En définitive, notre thèse porte sur *l'élaboration de modèles de planification tactique et opérationnelle du transport du bois-forêt*, dans un contexte de migration vers les chaînes collaboratives d'approvisionnement. Le positionnement de notre recherche est caractérisé par les cases grisées des Tableaux 1.1. et 1.3.

1.6 Méthodologie de recherche

Nous décrivons ici la méthodologie adoptée (Figure 1.5) pour atteindre les objectifs précédemment définis.

L'élaboration de nos propositions a été guidée par l'observation de pratiques industrielles, issue de l'accès aux données métier d'une entreprise de transport forestier du Lot-et-Garonne, et par l'évaluation de performances comparées entre ces pratiques et nos modèles de décision optimisée. Partant de l'analyse d'un cas industriel, nous avons reconstitué une activité réelle qui, après retouches et validation par nos interlocuteurs du milieu professionnel, a constitué un modèle de référence (Modèle 'AS-IS'), pour lequel nous avons établis des indicateurs de performance. Par ces mêmes indicateurs, nous avons ensuite évalué les améliorations de performance issues des modèles d'optimisation (Modèles 'TO-BE') élaborés dans cette thèse.

La méthodologie que nous avons suivie nous a donc permis d'intégrer les contraintes-métier du secteur bois-forêt dans nos modèles de décision tactique et opérationnelle et de retenir des indicateurs de performance jugés pertinents dans ce secteur.

L'originalité de notre approche est de réaliser une planification tactique agrégée et globale des activités de transport dans une organisation logistique capable de centraliser chez un acteur, ou chez un tiers que nous nommons intégrateur logistique, les informations nécessaires au raisonnement tactique qui orchestre les activités des acteurs. Le calcul des tournées opérationnelles s'effectue ensuite pour chacune des flottes de camions impliquées dans le plan tactique.

Nos modèles analytiques relèvent de la programmation linéaire mixte et nous utilisons le solveur CPLEX d'IBM. Ce faisant, nous avons priorisé la validation de nos modèles d'optimisation, aux dépens du temps de calcul, notamment dans l'optimisation des tournées. Dans une perspective de passage à l'échelle industrielle, le recours à des heuristiques fournissant des solutions sous-optimales en un temps compatible (quelques heures) avec le besoin industriel doit être envisagé.

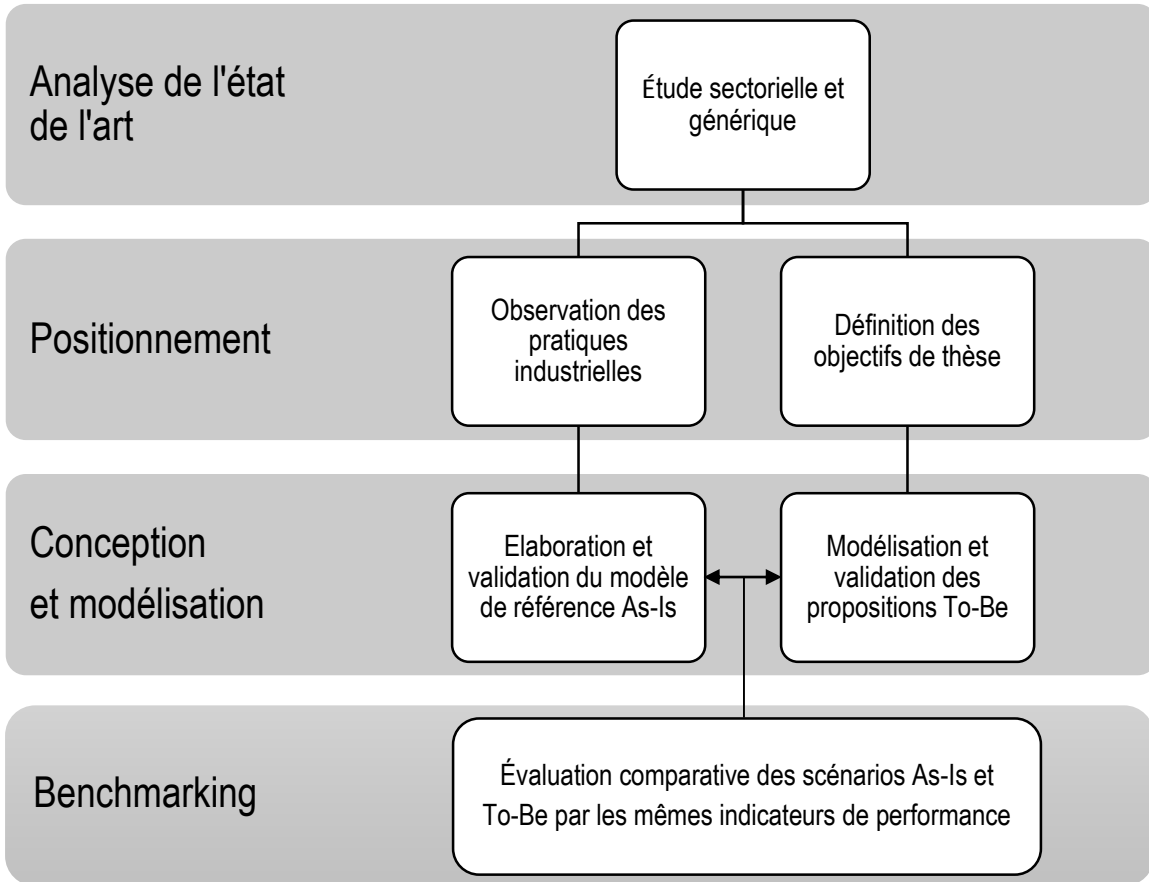


Figure 1.5: Méthodologie de recherche

Chapitre 2 : Spécificités sectorielles de la logistique forestière

2 Spécificités sectorielles de la logistique forestière

2.1 Introduction

Le présent chapitre vise à identifier les contraintes du transport forestier, dont certaines relèvent de la problématique générale du transport, tandis que d'autres sont spécifiques au secteur d'activité. La prise en compte des principales spécificités sectorielles du transport forestier est en effet nécessaire pour permettre une formulation suffisamment réaliste du problème à résoudre et justifier la modélisation qui en est faite au chapitre 3.

Nous décrivons ici la filière forestière, plus particulièrement telle qu'elle se présente en Aquitaine, en explicitant les processus décisionnels impliquant les principaux acteurs.

Le chapitre se structure comme suit :

Nous commençons par décrire les aspects particuliers de la matière première par la nomenclature d'un arbre sur pied, et considérons les débouchés, qui engendrent des flux physiques divergents.

Nous dressons ensuite un portrait des pratiques couramment observées en région Aquitaine. À cet effet, nous proposons une schématisation de la configuration du réseau des acteurs de la filière bois-forêt (exploitants forestiers, transporteurs, clients) et du processus décisionnel sous-jacent.

Puis, nous décrivons les ressources déployées dans le transport de bois et les capacités s'y rattachant, qui font du transport forestier une activité coûteuse nécessitant des véhicules performants et des chauffeurs particulièrement qualifiés.

Par ailleurs, comme tout transport de marchandises, le transport de bois est soumis à des réglementations routières et des autorisations préfectorales strictes, qui induisent des itinéraires de circulation bien définis dans le réseau public de transport. Nous résumerons ces principes de circulation en région Aquitaine.

Enfin, nous abordons la dimension économique et commerciale du transport forestier, en faisant la part des coûts fixes et des coûts kilométriques.

La fin du chapitre est dédiée à l'analyse d'un cas industriel que nous avons menée en région Aquitaine.

2.2 Produits transportés et débouchés

La sylviculture est une activité agricole qui consiste à faire croître et à exploiter des arbres en forêt pour produire du bois. La ressource bois est ensuite utilisée par diverses filières de transformation. Plusieurs modes de récolte sont possibles, impliquant diverses techniques de coupe, d'ébranchage, de tronçonnage, etc. (Lebel et al, 2009).

Les bois extraits de la forêt sont ensuite empilés en stocks homogènes (par essences, niveaux de qualité et dimensions) en bord de route, en vue de leur chargement sur des véhicules de transport. Dans la forêt aquitaine, qui bénéficie d'une diversité des conditions de sol et de climat, une large gamme d'essences est exploitée : pin maritime, feuillus (chêne, châtaignier, hêtre, noyer, peuplier).

Les bassins de production sont principalement localisés dans trois massifs:

- Le massif des Landes de Gascogne, où 90% de la production est en pin maritime,
- Le massif de Dordogne, où la proportion de bois de résineux et de bois de feuillus est équilibrée,
- Les forêts d'Adour-Pyrénées, qui permettent la production de chêne.

Ces essences constituent une ressource importante, assez facilement valorisable par les industries de transformation de bois. L'activité économique générée par la filière forêt-bois en Aquitaine est de première importance, à l'instar du secteur vinicole ou l'aéronautique.

Par définition, les tiges sont des arbres complets qui ont été ébranchés. Les billons (ou billes) sont obtenus lorsque l'opération de tronçonnage est réalisée en forêt. La « ressource sur pied » (l'arbre) se décompose en plusieurs zones de qualité, visant chacune un marché.

Les produits transportés, de la forêt aux usines, sont classifiés selon plusieurs critères principaux (Jordan, 2012) :

- L'essence
- Le diamètre min et max (les machines en usine ne peuvent pas absorber tout diamètre)
- La longueur (précision à 2 cm près)
- La flèche ou courbure
- La classe de qualité

Par rapport à ces débouchés, la tendance est au déclassement (surqualité) de la ressource pour équilibrer les flux. Par ailleurs, une demande abondante de bois de caissage entraîne une production corollaire de bois de souche, qui ne trouve de débouché qu'en trituration. Cet inconvénient est dû au caractère divergent des processus amont de production de bois, contrairement à la plupart des filières de production industrielle,

notamment manufacturières, où les processus convergent vers la l'assemblage de produits à partir de composants multiples.

Au total, le secteur de la forêt et du bois associe en amont une filière éminemment hétérogène, tant au niveau des producteurs que des produits, et en aval, une filière caractérisée par la multiplicité de marchés et de processus mis en œuvre (Dufлот et al, 2013).

2.3 Écosystème du transport de bois

Notre analyse de la logistique d'approvisionnement de la filière bois-forêt, issue de la littérature scientifique et professionnelle, de notre séjour à FORAC, des échanges avec le FCBA, nous amène à des observations qui nous semblent importantes pour intégrer les contraintes métiers et nous conduire à une représentation de l'écosystème du transport forestier. Une particularité de la filière bois-forêt en France réside dans le fait qu'il existe un découplage fort entre les détenteurs et les utilisateurs de la ressource forestière. De manière générale, les forestiers n'ont pas investi dans l'industrie de transformation du bois, et vice versa (Bigot, 2010).

De plus, le transport de bois proprement dit est le plus souvent externalisé, c'est-à-dire réalisé en sous-traitance par des entreprises de transport indépendantes des donneurs d'ordre et n'intervenant pas dans les transactions entre offreurs et transformateurs de bois.

L'approvisionnement du bois s'effectue pour partie en forêt publique et pour partie en forêt privée, dans des proportions variables selon les pays et les régions. En France, 1/4 du territoire forestier est public et 3/4 du territoire est privé. En Aquitaine, 9/10 des surfaces exploitées sont privées et 1/10 seulement sont publiques (Les équipes FCBA et les professionnels, 2015).

Enfin, nous notons que l'offre de bois par les propriétaires privés prend la forme de très nombreux points d'approvisionnement largement disséminés sur le territoire, pour des volumes en contrepartie limités. En Aquitaine, le morcellement de l'offre privée se caractérise par 130 000 propriétaires détenant plus d'un hectare de forêt (Dufлот et al, 2013).

2.3.1 Configuration du réseau d'acteurs

On identifie trois rôles dans la chaîne de transaction : Propriétaire, Approvisionneur et Client. Chaque rôle répond à des objectifs, décline des activités et utilise des services-soutiens (Tableau 2.1).

Tableau 2.1: Rôles transactionnels des acteurs

Rôle	Propriétaire	→	Approvisionneur	→	Client
Objectif	Valorisation du patrimoine foncier	BOIS sur Pied	Plus-value achat (sur pied) / revente (à façon)	BOIS à Façon	Plus-value manufacturière
Activité	Fait pousser le bois		Achète le bois sur pied Fait abattre et façonner Fait débarder Fait livrer		Acheter et Transformer le bois
Services-Supports	Gestionnaires Sylviculteurs		Entreprise des Travaux Forestiers (ETF) Transporteurs		Sous-traitants

Dans ce contexte, nous considérerons une configuration typique de réseau d'acteurs (Figure 2.1), dans lequel un rôle central est joué par l'exploitant forestier. Ce prestataire de service prend en charge la fonction d'approvisionnement pour le compte de ses clients (usines consommatrices), en procédant aux achats de coupes et en sous-traitant les opérations physiques de coupe et de débardage aux entrepreneurs forestiers, ainsi que les opérations de transport aux transporteurs. Véritable orchestrateur de l'approvisionnement et du transport, l'exploitant forestier apparaît comme l'opérateur clé de la chaîne d'approvisionnement et contribue fortement à la performance logistique.

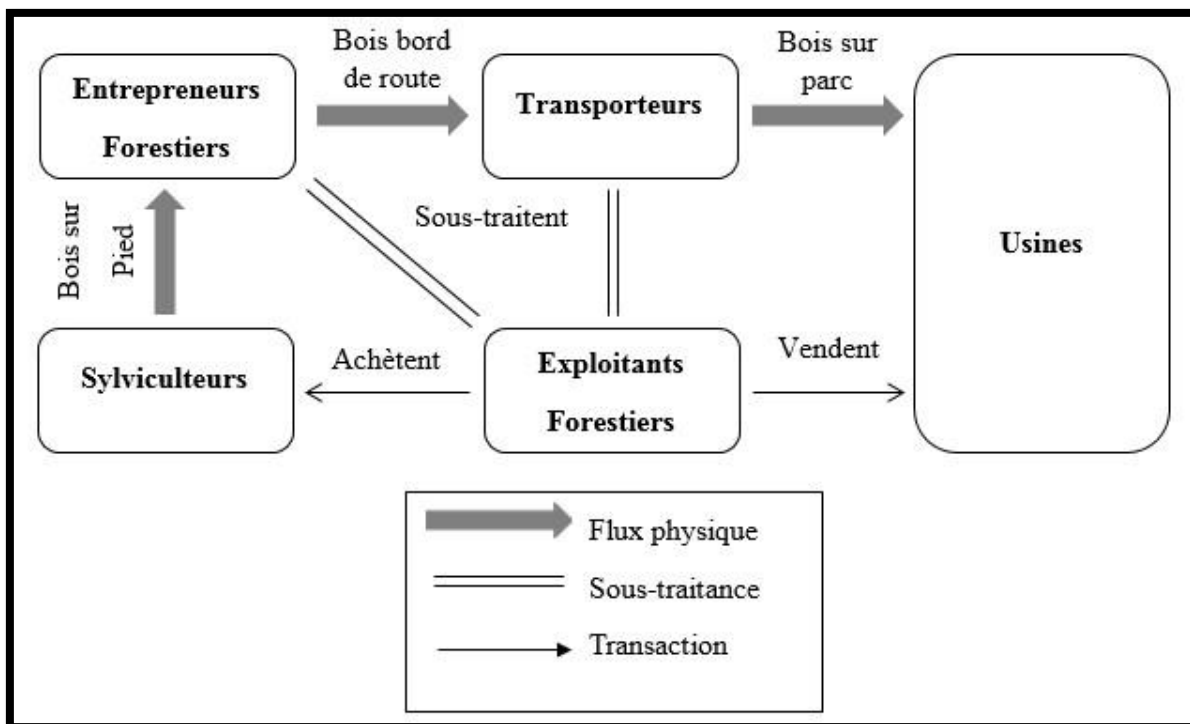


Figure 2.1: Configuration du réseau d'acteurs

2.3.2 Gestion du transport

Les moyens de transport et les personnes à qui en incombe la responsabilité peuvent être très différents d'une compagnie à l'autre (Epstein et al, 2007). Un exploitant forestier peut posséder sa flotte de camions et ses propres équipements de manutention. Une grande compagnie de transport peut travailler pour plusieurs exploitants forestiers. Aussi, le transport peut-il être sous-traité à des entrepreneurs forestiers, à des coopératives forestières, à des groupes de gestion forestière ou à plusieurs petits transporteurs (Lehoux et al, 2012). Dans ce contexte, le transport est une fonction que chaque acteur peut internaliser ou externaliser. Généralement, un contrat est établi (habituellement pour un an) entre la compagnie de produits forestiers (exploitants forestiers) et la compagnie de transport, dans lequel sont décrites les obligations de chacune des parties. Le transport de bois peut être effectué selon deux manières (Bourcet et al, 2008) :

- en compte propre : quand le propriétaire des bois, exploitant ou client, utilise ses propres camions,
- pour compte d'autrui : lorsqu'une entreprise de transport fait une prestation de service pour un intermédiaire ou pour un utilisateur de la filière.

Le transport en compte propre peut paraître économiquement plus rentable. Cependant, dans ce secteur comme dans d'autres, la tendance est à l'externalisation du transport. Notamment, les scieries se concentrent sur leur cœur de métier et incitent leurs chauffeurs à se mettre à leur compte (Bourcet et al, 2008).

Du côté du client, on distingue deux types de commande :

- les commandes périodiques, contractualisées ou non,
- les commandes « spot », à caractère événementiel.

Une commande de transport est le plus souvent caractérisée par :

- une échéance de livraison à horizon d'une semaine,
- un client unique (le chargement de bois pour plusieurs clients est peu pratiqué),
- un produit qualifié (essence, qualité, longueur, diamètre...), un volume.

La durée du transport est, en règle générale, inférieure à la journée : on charge, transporte et décharge le même jour.

Les instructions à l'attention du chauffeur sont stipulées par une feuille de route qui identifie :

- les coordonnées géodésiques des sites de chargement (stocks bords de route), assorties d'une date/heure de disponibilité de bois sur site,
- les sites de déchargement (usines-clients), avec date/heure de livraison,
- les bons de livraison à faire viser par les clients, attestant la réception en vue de la facturation du transport.

Nous notons que le transport résulte d'une planification à court terme, définie sur une semaine, qui détermine les tournées et les feuilles de routes des véhicules pour chaque jour de la semaine. La logique opérationnelle est des plus simples, consistant à livrer la quantité requise par un client en réalisant des rotations entre un point de chargement et le client, ou, si le stock bord de route est insuffisant, en collectant le bois en plusieurs points de chargement.

Les volumes demandés étant généralement des multiples entiers de la capacité d'un camion, les camions sont chargés à plein sur les sites forestiers et la totalité du chargement est livrée au client.

Enfin, nous notons que l'usage de logiciels de calcul de tournées est peu répandu dans le transport forestier, et que le cloisonnement des affaires n'a pas favorisé jusqu'ici les pratiques multi-drops que l'on peut rencontrer dans d'autres secteurs de transport.

2.4 Ressources du transport routier de bois ronds

La diversité de la ressource (bois d'œuvre, bois d'industrie et bois-énergie) rend nécessaire une personnalisation des véhicules pour différentes classes de bois. Sans objectif d'exhaustivité, nous considérons dans ce paragraphe le cas du transport des bois ronds et décrivons les principaux aspects techniques et réglementaires qui, en France, définissent la capacité opérationnelle des camions et de leurs chauffeurs.

2.4.1 Aspects réglementaires et techniques

Le transport de bois rond en France est soumis à des règlements préfectoraux (Le Net et al, 2007), qui régissent pour chaque département les conditions de circulation des ensembles routiers (tracteurs et remorques) transportant le bois rond. L'objectif de cette réglementation est :

- de permettre la desserte des industries de la première transformation du bois
- d'assurer la continuité de circulation entre départements

Les ensembles routiers ne peuvent pas circuler :

- sur l'autoroute s'ils ne peuvent pas atteindre une vitesse en palier de 50 km/h
- sur l'ensemble de réseau :
 - o par temps de neige ou de verglas,
 - o lorsque la visibilité est insuffisante.

Les itinéraires de circulation et les tonnages autorisés (PTRA, Poids Total Roulant Autorisé) sont définis par arrêtés préfectoraux, qui peuvent malheureusement se traduire par des discontinuités de réseau d'un département à l'autre (Figure 2.2).

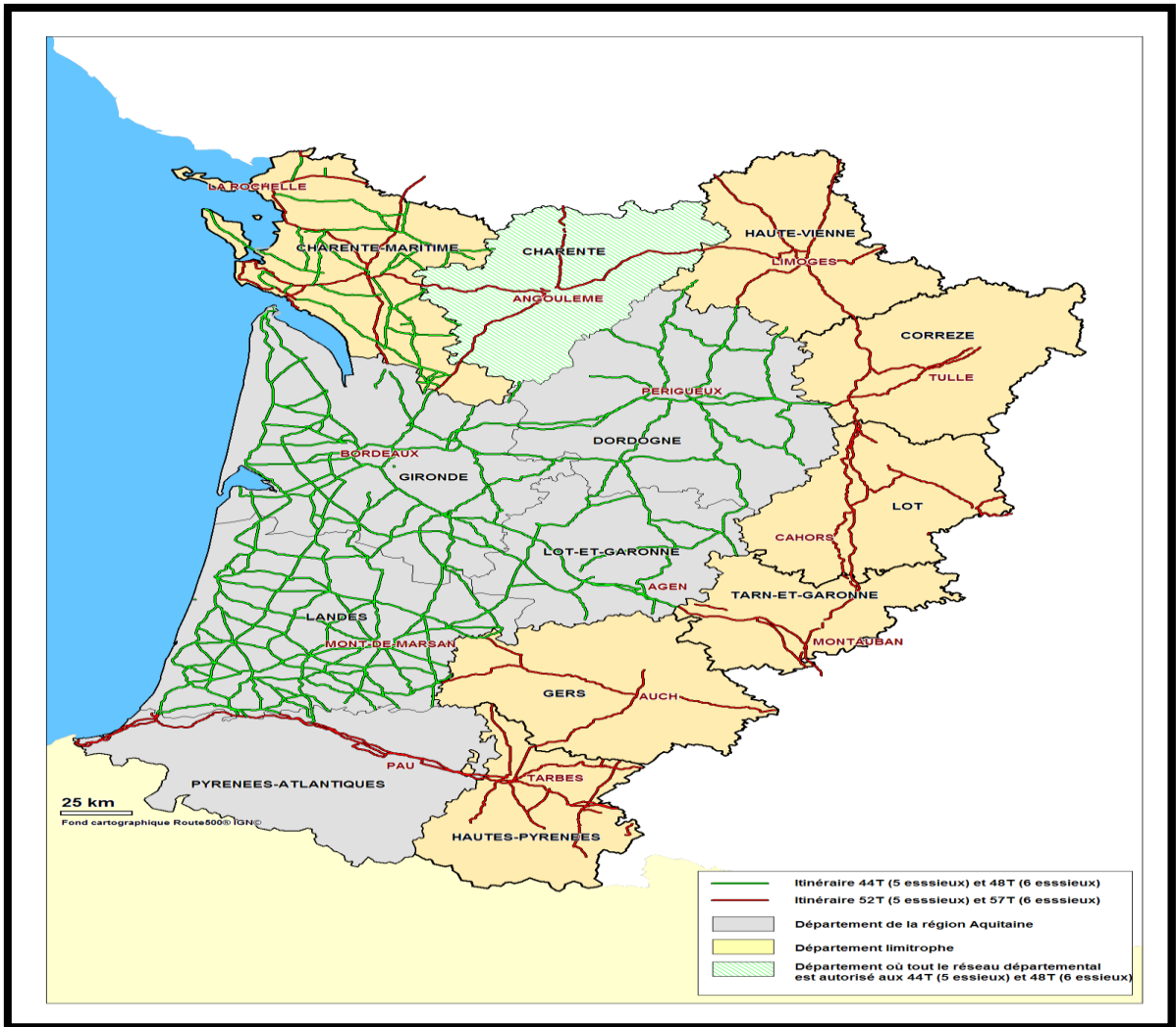


Figure 2.2: Itinéraires et charge autorisés par arrêtés préfectoraux en Aquitaine (Hamascek et al, 2008)

Les horaires de conduites vont du lundi ou lendemain de fête à 6h au samedi ou veille de fête à 12 h, sauf dérogation accordée par le préfet. La réglementation limite le temps de conduite à :

- 9 heures dans une même journée, 10 heures au plus deux fois par semaine,
- 56 heures dans une même semaine, 90 heures sur deux semaines consécutives

Les dimensions des ensembles des véhicules doivent correspondre aux normes des articles R 312-10 (largeur) et R 312-11 (longueur) du code de la route. Un ensemble routier, composé d'un tracteur équipé d'une grue et d'un arrière train forestier, ne doit pas dépasser une longueur de 18,75 mètres, à laquelle peut s'ajouter un dépassement du chargement à l'arrière n'excédant pas 3 mètres (Figure 2.3). S'agissant de grumes, une autorisation exceptionnelle peut être accordée aux ensembles routiers dépassant les dimensions réglementaires (Laffitte, 2013).

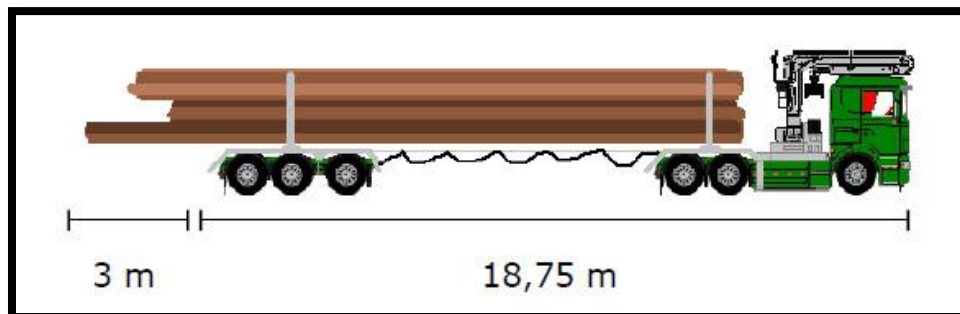


Figure 2.3: Dimension maximale des ensembles routiers, d'après (Laffitte, 2013)

Les principaux types d'ensembles routiers de transport de bois ronds, de poids total 48 tonnes et 57 tonnes sont décrits dans l'Annexe 1. Les camions disposent ou non d'une chargeuse (grue). Enfin, le chargement réel du camion est évalué par différents systèmes de pesage embarqués (Emeyriat et al, 2009) :

- Pèse-essieux (manomètre sur suspension pneumatique),
- peson en bout de flèche de grue,
- pesée sous sellette (manomètre sur châssis sous sellettes).

Cependant, certains ensembles routiers ne possèdent pas de système de pesage embarqué.

Pour l'Aquitaine, selon une étude menée par FCBA (Arraiolos et al, 2011b), l'essentiel de la flotte est constitué de tracteurs avec semi-remorque (Annexe 1, Figure a.3) à 5 ou 6 essieux. Par ailleurs, 83% des ensembles routiers possèdent une grue embarquée pour la manipulation des bois, dont le poids important (2 tonnes au moins) diminue d'autant la charge utile.

En définitive, la capacité de transport, ou charge utile, d'un ensemble routier est déterminé par le poids total roulant autorisé (PTRA) dont il faut soustraire le poids à vide (tare) du matériel roulant (Tableau 2.2).

Tableau 2.2: Charge utile des ensembles routiers, adapté de (Arraiolos et al 2011b)

PTRA	Charge utile (t)
44/48 tonnes (phase transitoire)	27,4
48 tonnes 5 essieux	29,1
57 tonnes 6 essieux	36,3

Les décrets relatifs au transport de bois ronds concernant la surcharge et le contrôle de poids sont explicités en annexe (Annexe 2).

2.4.2 Aspects économiques et commerciaux

Le coût du transport constitue une part importante des coûts logistiques. Le coût du transport résulte de coûts fixes (amortissements, intérêts, taxes, assurances, salaires) et de coûts variables (carburant, pneus, entretien

et réparations, chargement/déchargement) qui sont fonctions du tonnage et du kilométrage (Lebel et al, 2009, Jordan, 2012). En conséquence, l'augmentation du rayon d'approvisionnement augmente nécessairement les coûts logistiques.

Pour la France, on trouve dans (Bourcet et al, 2008) une estimation des frais fixes à hauteur de 6 € par tonne de charge utile définissant le camion et des frais kilométriques de l'ordre de 0,06 € par tonne et par km. Selon ces valeurs, le coût d'utilisation d'un véhicule 5 essieux de 22 tonnes de charge utile pour un transport de 70 km s'élevait en 2008 à 225 €.

Tableau 2.3: Exemples de facturation des transports de bois

Produit	Diamètre en Centimètre	Longueur en mètre	Quantité livrée en tonne	Distance en Km	Coût total de transport en euros
Déroutage sans nœuds - Pin maritime	27.00	2.60	32,56	43.03	202,52
Caissage - Pin maritime	22.00	2.30	29,8	87.95	256,28
Canter / Petit sciage - Pin maritime	15.00	2.50	33,2	47.55	215,14

Pour synthétiser, la plus grande partie des coûts est représentée par l'amortissement du véhicule, suivi des frais de carburant, et des salaires et des frais d'entretien (Figure 2.4); les taxes et les assurances ainsi que le péage ne représentent que 3,4% des coûts.

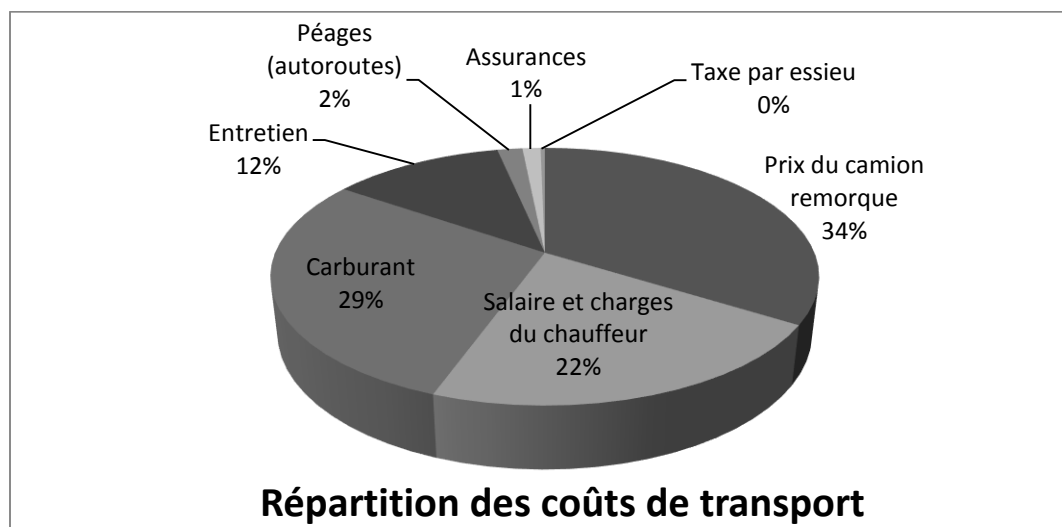


Figure 2.4: Répartition des coûts annuels de transport en France pour un camion de 57 tonnes, adapté de (Jordan, 2012)

2.5 Cas d'étude en Aquitaine

Nous présentons ici un cas d'étude industriel illustrant les pratiques du transport forestier en région Aquitaine. Ce cas industriel servira de référence pour la validation de nos propositions méthodologiques consignées dans le chapitre 3.

L'entreprise, basée à Casteljaloux en Lot-et-Garonne, est une PME implantée de longue date dans le secteur forestier aquitain. Offrant des services intégrés de produits forestiers, l'entreprise couvre plusieurs activités d'approvisionnement de bois sur pied, exploitation forestière et transport de bois.

Les produits forestiers sont acheminés des lieux de coupe (stocks bord de route) aux points de livraison (usines clientes) via un vaste réseau de routes publiques et forestières. A cet effet, l'entreprise dispose de deux gestionnaires de transport (décideurs logistiques) déterminant manuellement, chaque jour pour le lendemain, le plan de livraison de leurs clients et le routage de ses 9 camions et chauffeurs.

La flotte de camions de la société est homogène, d'une capacité de 37 tonnes chacun et équipés d'une grue embarquée. Le siège de la compagnie constitue l'unique dépôt, point de départ et d'arrivée des tournées quotidiennes.

Les demandes des usines et les quantités de bois à livrer sont exprimées en unités de chargement plein (37 tonnes). L'entreprise ne dispose pas du niveau réel des stocks bord de route, mais simplement d'une estimation. Au global, le volume total d'activités est de l'ordre de 600 tonnes par jour, ce qui représente un peu moins de deux livraisons par jour et par camion en moyenne. L'entreprise a toute latitude pour décider du jour et de l'heure de livraison, mais certains clients imposent des plages de livraison, par exemple, entre 8h et 13h, en dehors desquelles les parcs de réception sont fermés.

Pour l'essentiel, les pratiques de l'entreprise sont soumises aux principes suivants :

- satisfaire la demande : les livraisons répondent aux commandes globales des différents clients, en volume et en nature (essence, qualité, type de produit),
- ramasser les fonds de piles : un fond de pile est le reliquat d'un stock bord de route résultant des prélèvements antérieurs, et dont le volume est inférieur à une unité de chargement. Il convient alors de ramasser ces reliquats, tant pour des raisons sanitaires que de productivité. Le ramassage des fonds de pile induit des tournées circulaires de type *multipick*,
- retour éventuel en charge au dépôt en fin de journée. Dans environ 80% des cas, on constate le retour en charge du camion au dépôt en fin de tournée, par anticipation des livraisons du lendemain. Dans les cas restants, le déroutement des camions que nécessite le retour en charge s'avère contre-productif et n'est pas réalisé.

2.5.1 Collecte de données

Les entrevues en entreprise ont permis d'identifier les pratiques d'élaboration des tournées de livraison au jour le jour et il nous a été communiqué la trace de l'activité des 9 chauffeurs sur deux semaines (Figure 2.5).

Ce document, utilisé pour la facturation des transports aux clients, stipule les lieux de chargement et de déchargement avec leurs coordonnées GPS, ainsi que les tonnages déchargés chez les clients.

Les données n'indiquent pas les commandes réelles, ni les niveaux de stock bord de route, et ne précisent pas l'existence éventuelle de fenêtre d'ouverture des sites de livraison.

Semaine chauffeur													
heure début journée/fin journée	type	date	salarié	N° BL	commune chargement	latitude chargement	longitude chargement	nom client	commune déchargement	longitude déchargement	latitude déchargement	quantité T	
5h18	vide												
	Livraison	#####	LECOMTE	25489	BOUSSES	44,16604	0,07655	TEMBEC TARTAS	TARTAS	-0,82674	43,83156	36,780	
	Transport	#####	LECOMTE	9552	AUDON			GARNICA PLYWOOD FRANCE	SAMAZAN	0,13045	44,43419	38,140	
	Rechargement	#####	LECOMTE		LAGRUIERE								
		#####	LECOMTE		RETOUR DEPOT CASTEL								
15h46													
4h34	Transport	#####	LECOMTE	9583				FIBRE EXCELLENCE SAINT	ST GAUDENS	0,72562	43,09884	35,350	
	Livraison	#####	LECOMTE	25512	BOUSSES	44,14621	0,09492	PERE ET FILS	MARMANDE	0,13915	44,50528	37,780	
	Rechargement	#####	LECOMTE		VERTEUIL D	44,4624	0,42479						
		#####	LECOMTE		RETOUR DEPOT CASTEL								
17h30													
5h16	Livraison	#####	LECOMTE	25531				TEMBEC TARTAS	TARTAS	-0,82674	43,83156	37,240	
	Transport	#####	LECOMTE	9554	AUDON			GARNICA PLYWOOD FRANCE	SAMAZAN	0,13045	44,43419	37,880	
	Rechargement	#####	LECOMTE		VERTEUIL D	44,4624	0,42479						
		#####	LECOMTE		RETOUR DEPOT CASTEL								
15h10													
4h13	Livraison	#####	LECOMTE	25556				TEMBEC TARTAS	TARTAS	-0,82674	43,83156	36,880	
	Livraison	#####	LECOMTE	25557	BOUSSES	44,14621	0,09492	PERE ET FILS	MARMANDE	0,13915	44,50528	14,000	
	Livraison	#####	LECOMTE	25557	BOUSSES	44,16743	0,10668	PERE ET FILS	MARMANDE	0,13915	44,50528	24,340	
	Livraison	#####	LECOMTE	25559	VERTEUIL D	44,4624	0,42479	STEICO Casteljaloux	CASTELJALOU	0,08453	44,32263	37,580	
	Rechargement	#####	LECOMTE		BOUSSES	44,14621	0,09492						
		#####	LECOMTE		RETOUR DEPOT CASTEL								
16h30													
4h42	Livraison	#####	LECOMTE	25578				FINSA France	MORCENX	-0,89797	44,01864	37,100	
	Transport	#####	LECOMTE	9556	AUDON			GARNICA PLYWOOD FRANCE	SAMAZAN	0,13045	44,43419	23,960	
	Transport	#####	LECOMTE	9556	DAX			GARNICA PLYWOOD FRANCE	SAMAZAN	0,13045	44,43419	13,200	
		#####	LECOMTE		RETOUR DEPOT CASTEL								
15h22													

Figure 2.5: Exemple de données du cas d'étude

2.5.2 Analyse des données

Nous avons procédé à plusieurs traitements visant à caractériser le cas d'étude. Ces traitements ont consisté à :

- identifier les points d'approvisionnements (bords de route) et de livraison (clients), ici caractérisées par leurs coordonnées géodésiques,
- en déduire la matrice des distances routières entre lieux de chargement et lieux de déchargement (Figure 2.6),
- reconstituer les demandes initiales des clients sur la base les livraisons constatées,
- reconstituer les niveaux de stock initiaux (bords de route).

Pour le traitement nous avons utilisé les outils suivants :

- MapPoint : pour la cartographie et le calcul des distances
- Excel : pour le traitement des données brutes

Somme de Valeur		Colonne2	Colonne										
Ligne2	Ligne	o Dépôt	o Sources	AUDON	BIRAC	BOUSSES	BRAX	CASTELMAYRAN	DAX	HOUILLLES	LA BREDE	LA CHAPELLE FAUCHER	LA REUN
o Dépôt	Castagnet Duméou	0,00	108,52	23,68	19,41	46,54	97,03	131,22	12,81	80,91	156,30		
o Sources	AUDON	108,33	0,00	108,63	96,26	135,69	196,49	31,83	101,03	145,11	323,25	11	
	BIRAC	27,74	108,14	0,00	39,49	69,63	124,02	130,84	39,80	53,50	214,08	28	
	BOUSSES	19,32	96,38	39,49	0,00	45,37	107,00	119,08	11,54	100,15	175,54	23	
	BRAX	48,91	135,84	72,24	45,40	0,00	55,41	158,54	45,38	117,53	169,27	45	
	CASTELMAYRAN	95,90	195,68	123,13	106,05	54,36	0,00	218,38	96,04	163,56	217,68	93	
	DAX	130,14	31,73	130,44	118,07	157,50	218,30	0,00	122,84	146,23	297,42	19	
	HOUILLLES	12,73	101,18	39,81	11,55	45,25	96,96	123,88	0,00	93,56	168,95	9	
	LA BREDE	81,72	145,44	53,62	100,53	115,04	163,90	146,89	93,93	0,00	167,66	83	
	LA CHAPELLE FAUCHER	157,88	325,17	215,40	176,15	169,69	219,29	298,89	170,09	169,71	0,00	16	
	LA REUNION	4,85	112,77	28,18	23,66	43,04	93,53	135,47	9,32	84,78	160,17	0	
	LAGRANGE	45,97	73,22	62,17	33,90	69,24	134,13	95,92	38,67	108,45	202,19	58	
	LAGRUIERE	19,74	127,66	39,74	38,55	40,11	91,63	150,36	29,77	79,81	144,32	18	
	LANDIRAS	73,57	111,52	38,05	71,64	106,89	155,75	133,38	85,78	28,06	188,65	7	
	LERM ET MUSSET	25,43	98,23	10,45	29,11	71,22	121,71	120,93	31,58	58,03	218,63	23	
	MARCIAC	107,18	104,41	123,38	91,18	99,84	119,45	127,11	99,88	180,88	341,45	11	
	MARIONS	19,10	108,17	13,77	37,76	64,89	115,38	130,87	31,16	62,55	163,95	23	
	MONHEURT	23,62	128,82	50,85	39,19	33,50	88,51	151,52	26,56	97,66	147,58	2	
	POMPOGNE	9,24	99,20	36,32	10,09	49,76	101,05	121,90	6,85	90,07	165,46	13	
	SAMAZAN	15,30	123,22	30,77	34,11	51,27	100,12	145,92	27,51	66,26	141,65	14	
	SAUVIAC	25,39	106,66	2,34	38,01	71,18	121,67	129,36	37,45	52,02	212,60	28	
	ST HILAIRE	189,69	285,91	216,92	199,84	148,15	103,68	252,14	189,83	257,34	315,30	18	
	ST MARTIN CURTON	12,79	111,87	24,20	27,46	60,93	111,42	134,57	20,22	68,08	169,48	13	
	ST MICHEL DE RIEUFRET	73,93	164,37	45,83	92,74	107,25	156,11	138,33	86,14	11,08	160,77	7	
	ST NICOLAS DE LA GRAVE	96,85	196,63	120,18	107,00	55,31	5,70	219,33	96,99	164,51	196,80	93	

Figure 2.6: Calcul de la matrice des distances routières

Nous avons cherché à évaluer les opportunités de retour en charge dans le réseau de transport. Pour ce faire, nous avons procédé en premier lieu à une cartographie des points d’approvisionnement (sources) et de livraison (clients), puis à l’analyse de la dispersion géographique des bassins correspondants (Tableau 2.4).

Tableau 2.4: Caractérisation des bassins d’approvisionnement et de livraison

A vol d’oiseau	Bassin d’approvisionnement (sources)	Bassin de livraison (clients)
Distance moyenne autour du barycentre	52,2 km	49,5 km
Distance max autour du barycentre	134 km	152 km

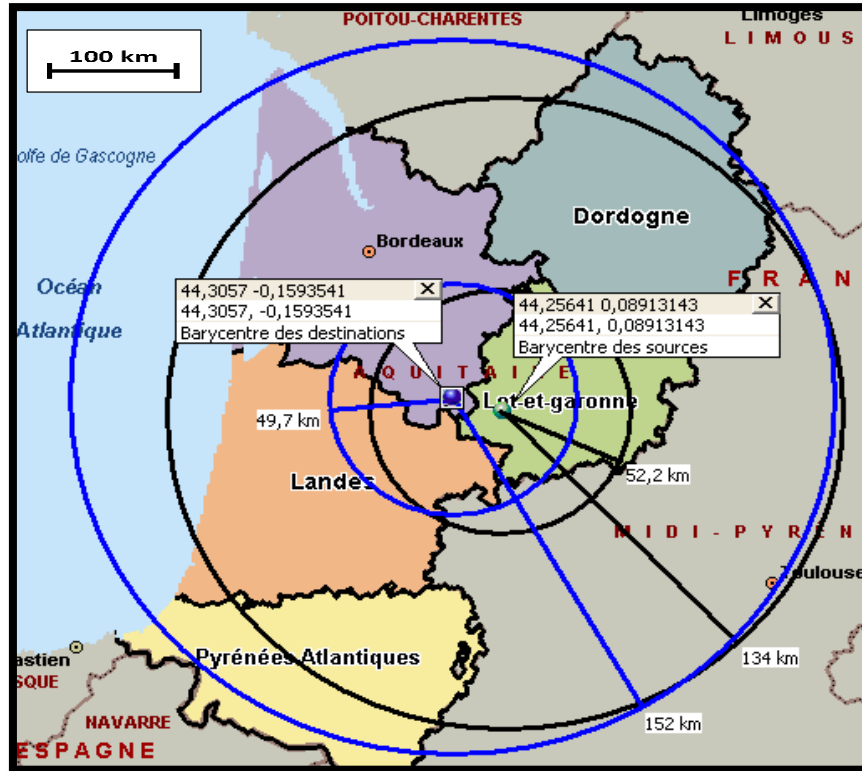


Figure 2.7: Bassins d'approvisionnement et de livraison

Sur cette base, nous avons identifié les distances routières kilométriques moyennes et maximales propres aux deux bassins (Tableau 2.5).

Tableau 2.5: Distances routières moyennes et maximales

Distance routière en km (moyenne maximale)	Dépôt	Sources	Clients
Dépôt	(0 0)	(59,34 188,58)	(66,88 250,10)
Sources	(59,76 189,69)	(92,76 342,12)	(100,64 389,25)
Clients	(67,03 249,82)	(100,19 389,10)	(98,77 406,05)

Nous avons ainsi constaté un large recouvrement des bassins d'approvisionnement et de livraison dont les centres géographiques sont proches du dépôt et dont les rayons sont similaires (Figure 2.7). Nous établissons ainsi une opportunité de retours en charge pour l'optimisation des transports de bois dans le réseau d'activité de la compagnie.

2.6 Conclusion

La logistique forestière qualifie l'ensemble des processus, ainsi que l'organisation multi-acteurs sous-jacente, qui concourent à l'approvisionnement et au transport du bois de la forêt vers les usines de transformation. Dans cet ensemble, nous nous focalisons sur l'activité de transport et les spécificités sectorielles qui s'y rattachent, que nous résumons dans les paragraphes suivants.

Selon les coupes préalables qui auront été faites, les points de chargement du bois sont multiples, non stationnaires, et, pour une classe donnée de produits, interchangeables. En effet, les propriétés forestières sont souvent morcelées et les volumes générés par les coupes peuvent être rapidement épuisés par les chargements de bois, ce qui rend les lieux de chargement très changeants. A contrario, la planification du transport peut tirer parti d'une certaine banalisation des stocks, c'est-à-dire qu'un volume de bois d'essence, de dimensions et de qualité données peut être disponible en différents lieux, ce qui constitue une latitude décisionnelle intéressante.

Par ailleurs, le faible volume des stocks bord de route conduit assez rapidement à des fonds de pile, c'est-à-dire des niveaux de stocks inférieurs au chargement d'un plein camion, nécessitant ainsi la programmation de ramassages plus ou moins fréquents. Cette particularité est largement observée sur le territoire Aquitain.

Enfin, le transport forestier fait l'objet de contraintes réglementaires qui déterminent la capacité des véhicules et restreint le réseau routier utilisable. L'objectif de cette réglementation est i) de permettre la desserte des industries de la première transformation du bois, ii) d'assurer la continuité de circulation entre départements.

En définitive, nous avons ici caractérisé les contraintes sectorielles du transport forestier, en le situant dans une logistique d'approvisionnement plus large, qui inclut les processus amont de coupe et débardage.

En référence à ces pratiques industrielles, nos travaux visent l'amélioration, par des techniques d'optimisation, du transport forestier. Les gisements de productivité du transport du bois de forêt doivent être mis en évidence par des expérimentations et des comparatifs de performance validant des pistes d'amélioration, sur lesquelles les gestionnaires de transport pourront s'appuyer. L'objet des chapitres 3 et 4 est donc d'évaluer les gains de performance qui peuvent être espérés de modèles de planification, en intégrant les principales contraintes métier du transport forestier, modèles à dimension générique qui devront pouvoir être instanciés et appliqués à une classe importante d'entreprises du secteur.

Chapitre 3 : Proposition d'un modèle de pilotage tactique et opérationnel du transport forestier

3 Proposition d'un modèle de pilotage tactique et opérationnel du transport forestier

3.1 Introduction

L'approvisionnement des usines de première transformation nécessite une organisation logistique pour collecter, transporter et distribuer la ressource bois en répondant aux objectifs de qualité (qualité physique des bois livrés, qualité de service en volume et en délai) et de productivité (minimisation des coûts de manipulation et de transport du bois).

Au regard des deux chapitres précédents, nous notons quelques particularités sectorielles de la chaîne logistique du bois.

Premièrement, la ressource étant naturelle et vivante, sa qualité est variable et les volumes disponibles après abattage sont incertains. Les zones d'approvisionnement sont dispersées et les lieux de chargement (stocks bord de route) fluctuent au fur et à mesure des coupes.

Les contraintes sanitaires obligent à enlever au plus tôt les bois stockés en bord de route, pour la qualité du reliquat et du site.

En second lieu, les fonctions de la chaîne logistique du bois (achat sur pied, coupe, débardage et transport) sont mises en œuvre par des acteurs (exploitants forestiers, entrepreneurs forestiers, entreprises de transport) intégrant ou externalisant plus ou moins fortement les fonctions. Ainsi, un exploitant forestier peut coordonner les opérations de coupe, de débardage puis de transport en faisant appel à des acteurs extérieurs. A contrario, une entreprise de transport forestier peut avoir elle-même intégré les fonctions amont de coupe et de débardage, voire même d'achat de bois sur pied.

Dans ce contexte, nous nous sommes focalisés sur le pilotage de la fonction transport stricto sensu, dont la productivité est l'une des clés de la performance de la chaîne logistique.

A l'évidence, les gains de productivité qui peuvent être attendus d'une optimisation du transport seront d'autant plus importants que le champ de l'optimisation, c'est-à-dire la masse de l'activité sujette à optimisation, est large. Il est toutefois important de noter que l'approche scientifique et l'approche industrielle ne coïncident pas nécessairement.

Du point de vue scientifique, il est souhaitable de mutualiser le plus globalement possible les marchés et les ressources de transport pour pouvoir trouver des modalités optimisées, se traduisant en particulier par un

moindre kilométrage et un meilleur taux de charge des camions lors de la réalisation d'un carnet de commande. Cette approche tend à centraliser le pilotage de l'activité de transport.

Du point de vue industriel, l'activité de transport est mise en œuvre par des PME autonomes ou internalisée chez les clients, chaque acteur œuvrant dans un écosystème propre et relativement invariant.

Aussi l'obtention de gains significatifs de productivité du transport nécessite-elle de rendre compatibles ces deux points de vue, à l'instar de ce qui se pratique dans d'autres secteurs industriels, par la mise en œuvre de *Supply Chains* ou partenariats étendus au sein desquels différents acteurs économiques indépendants (exploitants forestiers, transporteurs) exerceraient leurs activités dans un cadre supervisé assurant une efficacité globale, sans préjuger par ailleurs des modalités de redistribution des profits.

Dans cette perspective, nous présentons dans le présent chapitre une approche de pilotage de l'activité de transport forestier, basé sur l'optimisation des décisions tactique et opérationnelle du transport. Nous ne préjugeons pas ici du périmètre du partenariat, mais supposons l'existence d'un intégrateur logistique en charge d'optimiser une activité globale de transport. Les modèles présentés ici ont été conçus pour être applicables dans un contexte collaboratif, lui-même capable de fournir un ensemble de données relatives aux demandes clients, au niveau des stocks bord de route, aux capacités de transports sur un horizon temporel de moyen à court terme.

Nous introduisons au préalable les latitudes d'amélioration de productivité que ciblent nos propositions. Puis nous détaillons les modèles de pilotage au niveau tactique (planification des activités) et au niveau opérationnel (élaboration des feuilles de route). Enfin, nous présentons les indicateurs de performance qui nous permettent d'évaluer l'efficacité des plans de transport.

3.2 Gisements de productivité du transport forestier

Comme dans tout autre secteur industriel, la problématique d'approvisionnement du bois se décline aux niveaux stratégique, tactique et opérationnel, qui décrivent, du long terme au court terme, un ensemble de décisions basées sur une connaissance de plus en plus fine de l'activité à réaliser. Toutefois, l'activité de transport, au sens strict du transfert du bois des stocks bord de route vers les usines consommatrices, s'organise sur un terme assez court de quelques semaines. Nous nous concentrons donc sur les décisions tactiques, qui cherchent à planifier les capacités des ressources de transport à moyen terme, et sur les décisions opérationnelles, qui définissent les modalités concrètes de réalisation du transport.

Nous identifions deux principaux gisements de productivité du transport forestier, l'un au niveau tactique, l'autre au niveau opérationnel.

Au niveau tactique, il s'agit d'organiser l'activité de transport sur un horizon de quelques semaines, en vue de répondre à la demande (essence, qualité, dimension, volume et échéances), compte tenu des stocks bord de route disponibles (ou prévus) et de la localisation des clients. La planification vise ici à établir un plan d'activité journalière grossièrement décrit en termes de volumes à transporter, spécifiant les lieux de chargement et de déchargement, sans toutefois considérer le détail (flottes, routage et tournées) du transport. A ce stade, on juge l'adéquation de la capacité de transport au plan de charge tactique, ce qui permet de réserver les ressources internes et/ou externes nécessaires. En cas de sous-capacité, une sous-traitance temporaire peut être envisagée en faisant appel à un prestataire de transport. A contrario, le plan de charge peut révéler une surcapacité transitoire permettant de prendre des marchés complémentaires. La planification tactique est aussi le moment de mettre en œuvre des politiques générales de gestion, procédant à un lissage de charge (uniformisation de l'activité d'un jour à l'autre), ou, au contraire, cherchant à minimiser le *makespan*, c'est-à-dire réaliser l'activité globale de transport dans un temps minimum. Si cette problématique de planification est présente dans tout problème de transport, une spécificité sectorielle est ici que l'on peut jouer sur l'affectation des sources d'approvisionnement aux clients (Mohsen et al, 2011), en vue de minimiser le déplacement global du bois. Notons qu'il est plus intéressant d'optimiser l'affectation des sources aux clients au niveau tactique qu'au niveau opérationnel. En effet, une planification des transports sur le moyen terme fait apparaître davantage de clients et de points de charge, donc davantage de combinaisons d'affectation sources/usines que ce n'est le cas sur le court terme.

Au niveau opérationnel, il s'agit de minimiser le kilométrage des flottes de camions, et d'exploiter les opportunités de retour en charge (Gingras et al, 2007). Le principe du retour en charge est illustré par la Figure 3.1. En l'absence de retour en charge, considérons deux camions effectuant, l'un, un déplacement chargé S1-D1 suivi d'un retour à vide D1-S1, et l'autre un déplacement chargé S2-D2 suivi d'un retour à vide D2-S2.

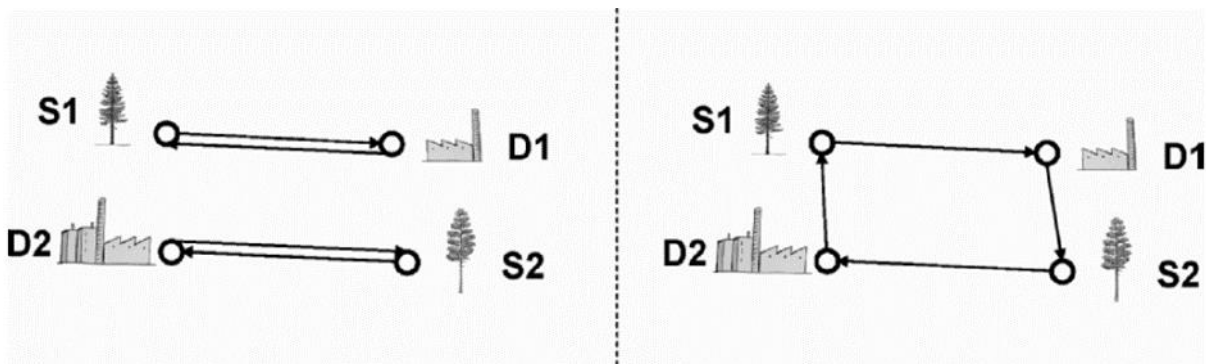


Figure 3.1: Principe du retour en charge ou Backhauling, d'après (Epstein et al, 2007)

Par comparaison, considérons un transport équivalent réalisé par un seul camion, réalisant un circuit S1-D1-S2-D2. Le bilan kilométrique pour ces deux scénarios est le suivant :

- sans retour en charge, le déplacement utile est $S1D1+S2D2$ et le kilométrage total est $2(S1D1+S2D2)$. Chacun des deux camions réalise 50% du déplacement à vide.
- avec retour en charge, le même déplacement utile requiert le kilométrage $S1D1+D1S2+S2D2+D2S1$, qui s'avère plus court que dans le cas précédent, dès lors que :

$$D1S2+D2S1 < S1D1+S2D2$$

C'est-à-dire lorsque le détour nécessaire au retour en charge est inférieur aux distances totales de transport. Dans ce cas, on ne mobilise qu'un unique camion, dont le taux de déplacement à vide est alors supérieur à 50%.

Notons que la possibilité de retours en charge, que traduit l'inégalité kilométrique présentée plus haut, suppose que les points de chargement de certains transports soient relativement proches des points de livraison d'autres transports, et donc que les bassins de chargement et de livraison se trouvent imbriqués. A contrario, si les usines consommatrices sont situées dans des zones éloignées des zones de coupe, il est évidemment impossible de procéder à des retours en charge.

Les modèles de pilotage que nous présentons ci-après ont intégré ces observations. Au niveau tactique, on cherchera à déterminer un approvisionnement pertinent, eu égard à la localisation des clients ; l'enjeu est ici de minimiser l'activité globale de déplacement du bois, exprimée en tonnes.km, par une affectation judicieuse des sources aux clients, et ce sans préjuger des modalités de transport. Au niveau opérationnel, la question est de définir un plan concret de transport, c'est-à-dire déterminer un routage performant des camions, afin de réaliser les déplacements de bois préalablement fixés par le niveau tactique. Ici, la performance opérationnelle vise à minimiser les distances totales parcourues, donc à réduire les trajets à vide avec un meilleur taux de remplissage des camions.

3.3 Mise en œuvre des modèles de pilotage

Ce paragraphe s'attache à décrire la mise en œuvre des modèles de planification tactique et opérationnelle détaillés plus loin, de manière à préciser leur séquençement et les modalités de leur application.

Nous modélisons la problématique de pilotage du transport forestier en une cascade de décisions en plusieurs temps.

1. Analyses préalables

- paramétrer le plan tactique : définir la valeur de l'horizon et de la période.
- grouper les commandes de transport à réaliser sur l'horizon.
- localiser les stocks disponibles et les clients, ainsi que les éventuelles plateformes logistiques, établir la matrice des distances routières propres au réseau.
- évaluer les capacités de transport internalisées et/ou externalisées (sous-traitants), de sorte à fournir une vue agrégée des moyens de transport disponibles par période.

La capacité agrégée de transport traduit le potentiel de transport d'une flotte, interne et/ou externalisée, ou d'un d'ensemble de flottes sur la période considérée. Le profil de capacité agrégée est donné sur l'horizon, tenant compte par exemple de journées de repos de certains chauffeurs, ou de fluctuation des capacités sous-traitées.

L'évaluation de la capacité agrégée, pour être réaliste, nécessite de considérer les modalités opérationnelles du transport. A cet effet, nous calculons, pour chaque période h de l'horizon de planification :

$$X(h) = \rho R W_c C(h) \quad (1)$$

avec

$X(h)$	capacité agrégée de transport, en tonnes.km, pour la période h
R	kilométrage journalier maximal des camions
W_c	capacité physique des camions (charge utile en tonnes)
$C(h)$	nombre de camions disponibles sur la période h
ρ	taux de charge moyen des camions

Notons le *caractère sensible de l'évaluation de la capacité agrégée $X(h)$* par la relation (1), relation qui, en tant que telle, assure l'interfaçage entre les modèles de niveau tactique et opérationnel. Le risque de sur-évaluation de la capacité agrégée de transport peut conduire à un plan tactique non réalisable au niveau opérationnel, alors qu'une sous-évaluation de la capacité agrégée viendra grever la performance opérationnelle par une sous-exploitation du potentiel réel de transport. Notamment, la valeur des facteurs ρ et R découlent de l'analyse des pratiques. En cas de méconnaissance de ces éléments, il reste possible de fixer arbitrairement $\rho = 0,5$ qui est une valeur très probablement réalisable et à estimer le kilométrage journalier maximal R sur la base d'une vitesse moyenne et d'un temps forfaitaire de chargement/déchargement à inclure dans un horaire de travail admissible.

2. Planification tactique (Générique)

Prise en compte de l'organisation : Non. La planification tactique revêt un caractère générique, sans préjuger de l'organisation logistique mono ou multi-acteurs.

Auteur de la décision : la planification tactique est réalisée par un orchestrateur de l'activité globale de l'entité logistique.

Entrées de la décision : commandes, niveaux des stocks, plans de coupe, capacités agrégées de transport.

Sorties de la décision : Plan de charge multipériode de l'entité logistique, sous la forme d'une matrice de transport par période et par type de produit. Ces matrices spécifient les volumes à transférer, pour chaque période et chaque produit, entre les sites d'approvisionnement et les clients.

3. Allocation des charges (Selon l'organisation en présence)

Prise en compte de l'organisation : L'organisation est explicitement prise en compte. Il s'agit de distribuer l'activité de transport calculée par le plan tactique à chacun des acteurs de transport, de sorte que la somme des transports spécifiés aux acteurs soit identique, par période, au plan de charge tactique global de l'entité logistique. Les modalités éventuelles de partenariat (mutualisation plus ou moins avancée des stocks, des clients, des flottes) s'expriment ici.

Auteur de la décision : orchestrateur / mandataire.

Entrées de la décision : Plan de charge tactique multipériodes.

Sorties de la décision : Plan de charge multipériodes par transporteur

4. Planification opérationnelle (par transporteur)

Auteur de la décision : transporteur, ou prestataire

Entrées de la décision : Plan de charge tactique multipériodes du transporteur, taille de la flotte, capacité physique des camions, emplacement des dépôts

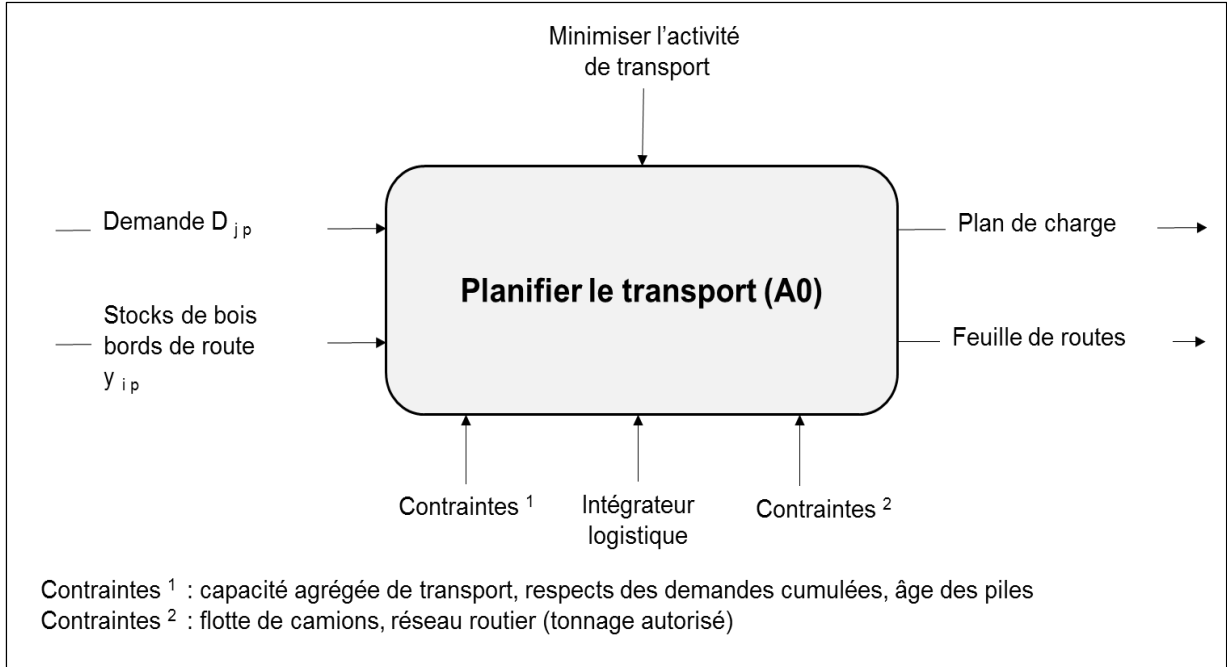
Sorties de la décision : définition des tournées par camion

Les modèles développés dans cette thèse concernent les étapes 1, 2 et 4. L'étape 2 (partage du plan de charge entre acteurs) est spécifique aux modalités de partenariat. Naturellement, si l'entité logistique est constituée d'un seul transporteur, l'étape 2 n'existe pas.

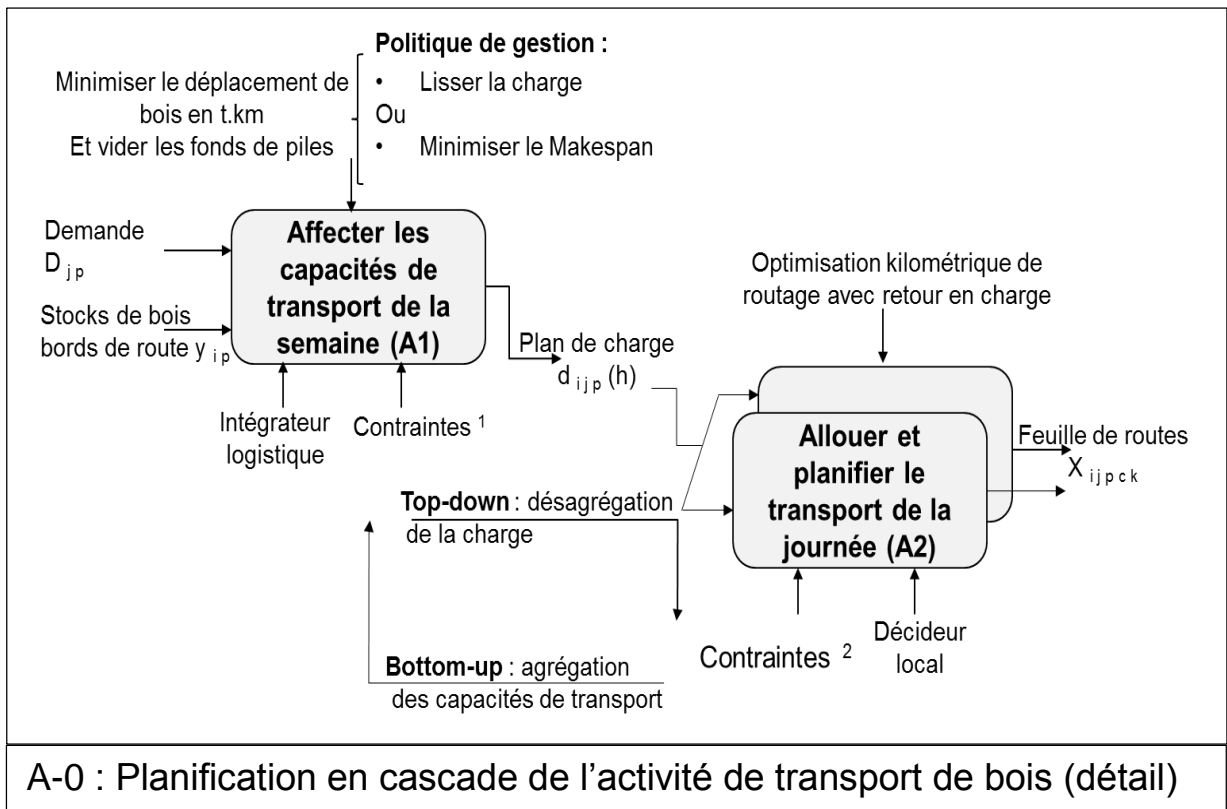
Un cas de figure courant dans la filière bois est celui d'un exploitant forestier externalisant les transports; dans ce cas, la planification tactique relèvera de l'exploitant forestier, tandis que l'optimisation du routage pourra incomber aux transporteurs. Un autre cas de figure est celui d'une entreprise de transport ayant intégré la

fonction d'exploitant forestier; les deux niveaux de planification sont alors mis en œuvre par le même acteur. Enfin, s'il s'agit d'un partenariat avancé, la planification tactique de la chaîne d'approvisionnement relèvera d'un intégrateur logistique mandaté par les différents acteurs, chaque transporteur recevant un plan de charge qu'il lui faudra convertir en une planification opérationnelle.

Le lecteur pourra se référer à la Figure 3.2 pour suivre la présentation détaillée de nos modèles et les notations afférentes.



A-0 : Planification agrégée de l'activité de transport (vision globale)



A-0 : Planification en cascade de l'activité de transport de bois (détail)

Figure 3.2: Planification multi-niveaux du transport forestier

3.4 Modèle de planification tactique

3.4.1 Fonctionnalités du modèle d'optimisation tactique

Ce premier modèle de décision vise à définir un plan de charge de l'activité de transport sur un horizon dit tactique (quelques jours à quelques semaines). Le réseau des sites sources (bords de route) et destinations (clients) est donné, ainsi que la matrice des distances kilométriques.

En outre, nous prévoyons l'existence d'une *plateforme logistique* en ajoutant au réseau un site complémentaire, à la fois destination et source, pour modéliser le contexte générique d'une organisation de transport forestier.

Connaissant les volumes globaux par produit à livrer à chaque client avant la fin de l'horizon, il s'agit de déterminer la distribution des activités de transport d'un jour à l'autre, en prenant en compte la disponibilité du bois dans les stocks bord de route.

Enfin, nous considérons que les niveaux des stocks bord de route disponibles à chaque période du plan tactique de transport peuvent résulter d'une coupe non encore réalisée au moment où est calculé le plan de transport. En d'autres termes, les stocks bord de route peuvent être réalimentés au fur et à mesure de leur consommation par le plan de transport. Cet aspect doit être pris en compte si l'on veut articuler l'optimisation des plans de transport avec l'optimisation des plans de coupe (non abordée dans cette thèse), en vue d'une planification conjointe des coupes et des transports.

Le modèle de planification tactique permet d'évaluer les ressources de transport à mobiliser dans chaque période journalière sur tout l'horizon de planification, qu'il s'agisse de ressources internes à l'acteur réalisant la planification, ou externalisées vers des transporteurs sous-traitants. A ce stade, les activités de transport journalières, ainsi que les capacités de transport sont *agrégées*, c'est-à-dire appréhendées par grandes masses, et ne seront détaillées qu'ultérieurement. Nous exprimons les activités agrégées de transport en tonnes.km, ce qui traduit un déplacement de bois par période, sans préjuger des ressources physiques (nombre et origine des camions) pour y parvenir, ni des routages opérationnels.

Au niveau de ce premier modèle de planification tactique, on retient deux options :

- lissage de charge : répartir uniformément l'activité sur l'horizon, ce qui constitue une politique courante évitant de mobiliser des capacités variables d'une période à l'autre,

Ou

- minimisation du *makespan* : faire en sorte que les capacités journalières disponibles soient entièrement engagées, de manière à minimiser la durée du plan.

Par ailleurs, nous intégrons la nécessité de vider les fonds de pile au cours de l'horizon couvert par le plan tactique.

Le modèle de planification tactique présenté ci-après fait appel à la Programmation Linéaire Mixte (MIP). La fonction objectif combine les orientations tactiques suivantes:

- (i) minimiser le déplacement de bois global induit par le plan,
- (ii) saisir une option tactique (lissage vs makespan),
- (iii) vider les fonds de pile avant la fin de l'horizon.

3.4.2 Données

Les ensembles et indices utilisés pour configurer le réseau et la portée du plan tactique sont les suivants :

Ensembles

I_R	ensemble des sites bords de route (hors fonds de pile)
I_F	ensemble des sites fonds de pile (à vider dans l'horizon)
$\{Pf\}$	plateforme logistique
I	ensemble des sites bord de route $I = I_R \cup I_F$
I^*	ensemble des sites de chargement $I^* = I \cup \{Pf\}$
J	ensemble des sites clients
J^*	ensemble des sites de livraison $J^* = J \cup \{Pf\}$
Δ	matrice des distances kilométriques entre sites
H	ensemble des périodes de planification (horizon)
P	nomenclature des produits

Indices

i	site source
j	site destination
p	produit
h	période

Données (demande, offre et capacité)

D_{jp}	demande globale en produit p , en tonnes, du site client j sur l'horizon H
δ_{ij}	distance kilométrique du site i au site j : $\Delta = (\delta_{ij} \mid i \in I, j \in J)$
$y_{ip}(0)$	niveau de stock initial en produit p , en tonnes, du bord de route i
$b_{ip}(h)$	quantité de bois, en tonnes, alimentant le bord de route i en produit p durant la période h
$X(h)$	capacité agréée de transport sur la période h (en tonnes.km)

3.4.3 Variables de décision

$d_{ijp}(h)$	tonnage en produit p à transférer du site i au site j durant la période h
$y_{ip}(h)$	niveau du stock bord de route i en produit p au début de la période h
f_i	variable binaire, vaut 0 si le fond de pile i est vide en fin de plan
$t(h)$	variable binaire, vaut 0 si la période h est inutilisée

3.4.4 Contraintes

Les contraintes du problème restreignent le champ des solutions au sein duquel la solution optimale sera recherchée. Les contraintes prennent la forme d'équations ou d'inéquations linéaires liant les variables de décision.

- **Satisfaire la demande cumulée des clients sur l'horizon**

$$\sum_{i,h} d_{ijp}(h) = D_{jp} \quad j \in J, \quad p \in P \quad (2)$$

Cette contrainte garantit que l'ensemble des livraisons répond strictement à la demande du client.

- **Tracer les niveaux de stocks bord de route**

$$y_{ip}(h) = y_{ip}(h-1) - \sum_{j,p} d_{ijp}(h) \quad i \in I_F, \quad h \in H \quad (3)$$

$$y_{ip}(h) = y_{ip}(h-1) + b_{ip}(h) - \sum_{j,p} d_{ijp}(h) \quad i \in I_R, \quad h \in H \quad (4)$$

Les contraintes (3) et (4) représentent l'évolution de la matière première dans les stocks bords de route au cours du plan :

La contrainte (3) suit les niveaux de stock des fonds de pile. Ces stocks ne sont pas alimentés pendant la durée du plan. La contrainte (4) calcule l'évolution des stocks bords de route en prenant en compte leur alimentation par les coupes et le débardage de bois pendant le plan.

- **Respecter de la capacité agrégée de transport par période**

$$\sum_{i,j,p} d_{ijp}(h) \delta_{ij} \leq X(h) \quad h \in H \quad (5)$$

La contrainte (5) assure que l'activité agrégée de transport durant chaque période n'excède pas la capacité agrégée de transport durant la période. Cependant, en cas de demande trop importante, le modèle ne peut trouver une solution. Cela signifie que le transporteur est sous-capacitaire. Il doit donc faire appel à une sous-traitance qui pourra se traduire par une capacité supplémentaire.

- **Purger les fonds de pile**

$$y_{ip}(H) \leq Mf_i \leq My_{ip}(H) \quad i \in I_F \quad (6)$$

où M est un nombre positif de valeur très élevée.

La contrainte (6), combinée à la minimisation de la composante J_2 de la fonction objectif, permet d'inciter, sans l'exiger, à la construction d'un plan de transport ayant pour effet corolaire de vider un nombre maximal de fonds de pile.

- **Contraintes de gestion de la plateforme logistique**

Ces contraintes représentent la politique de gestion des stocks dans la plateforme logistique. Par exemple, les contraintes :

$$y^-_p \leq y_{ip}(h) \leq y^+_p \quad i \equiv Pf, \quad p \in P, \quad h \in H \quad (7)$$

permettent de maintenir le niveau de stock de chaque produit p entre un plancher y^-_p et un plafond y^+_p .

3.4.5 Critère d'optimisation

La fonction objectif de notre modèle est formulée de la manière suivante :

$$\text{Min} (\alpha_1 J_1 + \alpha_2 J_2 + \alpha_3 J_3) \quad (8)$$

$$J_1 = \sum_{i \in I, j \in J, p, h} d_{ijp}(h) \delta_{ij} \quad (9)$$

$$J_2 = \sum_{i \in I_F} f_i \quad (10)$$

$$J_3 = \sum_h t(h) \quad (11)$$

Ou

$$J_3 = \sum_h \left| \sum_{i,j,p} \delta_{ij} [x_{ijp}(h) - \frac{1}{H} \sum_h x_{ijp}(h)] \right| \quad (12)$$

La minimisation de la valeur de la fonction objectif (8) cherche à :

- minimiser le déplacement global de bois en allouant au mieux les sources de bois (bords de routes) aux clients (composante J_1),

- inciter à vider les fonds de pile avant la fin du plan (composante J_2),

et ce, en optant (composante J_3) :

- soit pour une réalisation de l'ensemble du plan au plus tôt (11),
- soit pour un lissage de charge sur l'horizon, en substituant (11) à (12). Le lissage est obtenu en minimisant la somme de la valeur absolue des écarts entre l'activité de la période et l'activité moyenne des périodes sur l'ensemble de l'horizon. L'opérateur non linéaire de valeur absolue fait l'objet d'une linéarisation préalable dans CPLEX.

3.5 Modélisation de l'ordonnement opérationnel du transport

3.5.1 Fonctionnalités du modèle de planification opérationnelle

Le lien entre le plan tactique et le problème d'optimisation opérationnelle requiert la *désagrégation des charges et des capacités* manipulées par le raisonnement au niveau tactique, qui doivent être détaillées au niveau opérationnel. Cette étape de répartition du travail entre transporteur est spécifique à l'organisation en présence. Nous la supposons ici déjà réalisée, et considérons la traduction du plan de charge tactique alloué à un acteur en un plan opérationnel de transport impliquant sa propre flotte.

Le plan de charge établi par le niveau tactique fournit une matrice de transport par période

$$d_{ijp}(h), \quad i \in I, j \in J, p \in P, h \in H$$

Il s'agit maintenant, de construire la tournée des camions en considérant un ensemble de contraintes opérationnelles (nombre et capacité physique des camions, localisation des dépôts) tout en recherchant une performance opérationnelle, ici la réduction du kilométrage total de la flotte et l'augmentation du taux de charge moyen des camions. L'optimisation opérationnelle doit être réalisée pour chaque période du plan tactique. Le modèle opérationnel ci-dessous s'entend donc pour une période h implicite.

3.5.2 Données

Nous reprenons les notations utilisées pour la modélisation du réseau au niveau tactique :

I^*	ensemble des sites de chargement (bords de route, plateforme logistique)
J^*	ensemble des sites de livraison (clients, plateforme logistique)
P	nomenclature des produits
p	indice produit

et les complétons par les données opérationnelles

Dep	ensemble des dépôts de camions
S	ensemble des sites du réseau $S = Dep \cup I^* \cup J^*$
C	ensemble des camions disponibles dans la période
c	indice camion
d_{ijp}	consigne de transport: quantité de produit p à transférer du site i au site j dans la période
W_c	capacité physique (charge utile) du camion c
K	nombre maximal de mouvements alloué aux camions dans la période implicite
$depCam_{ic}$	clé binaire identifiant le dépôt du camion c (vaut 1 si le site i est le dépôt du camion c)

3.5.3 Variables de décision

Dans le modèle opérationnel, il faut, pour chaque camion, décider i) du routage, et ii) des tonnages à charger.

D'où les variables de décision :

x_{ijpck}	tonnage de produit p à charger en i au début du mouvement k et destiné au client j
z_{ijck}	binaire, vaut 1 si la route de i à j est empruntée par le camion c lors du mouvement k
w_{jpc}	tonnage de produit p , destiné au site j , du camion c au cours du mouvement k

On caractérise le routage de chaque camion c par le faisceau de matrices carrées binaires

$$z_c(k) = (z_{ijck} \mid i, j \in S) \quad k = 1, \dots, K$$

3.5.4 Contraintes

- **Contraintes de routage**

$$\sum_{j \in S} z_{ijc1} = 1 \quad i \in Dep \mid depCam_{ic} = 1, c \in C \quad (13)$$

$$\sum_{i, j \in S} z_{ijc1} = 1 \quad c \in C \mid depCam_{ic} = 1 \quad (14)$$

$$\sum_{i \in S} z_{ijcK} = 1 \quad j \in Dep \mid depCam_{jc} = 1, c \in C \quad (15)$$

$$\sum_{i \in S} z_{isc k-1} - \sum_{j \in S} z_{jsc k} = 0 \quad s \in S, \quad c \in C, \quad k > 2 \quad (16)$$

Les contraintes (13) à (15) obligent les camions à partir de leur dépôt en début de période et à y retourner en fin de période. La contrainte (16) assure la continuité spatiale du routage des camions d'un mouvement à l'autre.

- **Contraintes de satisfaction du plan de transport**

$$\sum_{c,k} x_{i j p c k} = d_{i j p} \quad i \in I, j \in J, p \in P \quad (17)$$

On satisfait le plan de transport émis par le niveau tactique, pour la période implicite, par la contrainte (17).

- **Contraintes de capacité**

$$\sum_{j,p} w_{j p c k} \leq W_c \quad c \in C, k \in K \quad (18)$$

Les contraintes (18) garantissent l'absence de surcharge des camions pour tout mouvement.

- **Contraintes de suivi des charges embarquées**

$$M \sum_{i \in S, i \neq j} z_{i s c k-1} \geq w_{j p c k-1} + \sum_{j \in S} x_{i j p c k} - w_{j p c k} \geq 0 \quad k > 2 \quad (19)$$

$$M[1 - \sum_{i \in S, i \neq j} z_{i j c k-1}] \geq w_{j p c k} \geq 0 \quad j \in J, p \in P, c \in C \quad k > 2 \quad (20)$$

$$w_{j p c k} = 0 \quad j \in J, p \in P, c \in C \quad (21)$$

Par les contraintes (19), un camion c arrivant j à la fin du mouvement $k - 1$ conserve à bord tous les contenus non destinés à j lors du mouvement k , augmentés du chargement éventuellement réalisé en j . Par contre, si le camion c arrive en j par le mouvement $k - 1$, alors son contenu $w_{j p c k-1}$ destiné au site j est livré avec la conséquence $w_{j p c k} = 0$ pour le mouvement k .

- **Contraintes de synchronisation des chargements**

$$M \sum_{s \in S} z_{i s c k-1} \geq x_{i j p c k} \quad i \in I, j \in J, p \in P, c \in C, k > 1 \quad (22)$$

Les contraintes (22) expriment que le chargement $x_{i j p c k}$ nécessite la présence du camion sur le site j .

3.5.5 Critère d'optimisation

$$\text{Min} (\alpha_1 J_1 + \alpha_2 J_2) \quad (23)$$

$$J_1 = \sum_{i,j,c,k} z_{ijck} \delta_{ij} \quad (24)$$

$$J_2 = \sum_c \left| \sum_{i,j,k} \delta_{ij} \left[z_{ijck} - \frac{1}{C} \sum_c z_{ijck} \right] \right| \quad (25)$$

L'optimisation du routage consiste à minimiser la distance globale (composante J_1 du critère) effectuée par la flotte de camions durant la période implicite, que l'on peut pondérer par exemple avec une exigence d'équilibrage des kilométrages alloués aux chauffeurs (composante J_2 du critère). L'équilibrage s'obtient en minimisant la somme des valeurs absolues des écarts entre le kilométrage global de chaque camion et le kilométrage moyen de la flotte. L'opérateur de valeur absolue est préalablement linéarisé par CPLEX.

3.6 Indicateurs de performance

Les fonctions objectif de l'optimisation tactique (réduire le déplacement du bois) et de l'optimisation opérationnelle (réduire le kilométrage de la flotte) constituent en tant que telles les performances principales recherchées par la planification. Néanmoins, l'efficacité de l'activité peut s'évaluer également au travers d'indicateurs de performances annexes, qui résultent des plans optimisés. Nous ferons la part des indicateurs tactiques et des indicateurs opérationnels, en distinguant ce qui relève de la performance locale (vue par chaque acteur) de la performance globale de la chaîne d'approvisionnement (Tableau 3.1).

Tableau 3.1: Principaux indicateurs de performance pour le transport du bois-forêt

Indicateurs	Locaux (par acteur)	Globaux
Niveau tactique (Approvisionnement)	<ul style="list-style-type: none"> • tonnage par période • makespan • déplacement de bois en t.km • nombre de fonds de pile ramassés • taux d'utilisation de la ressource de transport (taux de charge agrégé) 	Idem au périmètre du réseau logistique
Niveau opérationnel (Transport)	<ul style="list-style-type: none"> • kilométrage global de la flotte • taux de charge moyen des camions • nombre de mouvements effectués • efficacité (tonnage livré/km parcouru) 	Idem au périmètre du réseau logistique

Le calcul de ces indicateurs de performance est détaillé ci-après.

3.6.1 Indicateurs de niveau tactique

- Tonnage : masse de bois transportée (chargée et livrée), par produit et par période

$$m_p(h) = \sum_{i,j} d_{ijp}(h) \quad p \in P, h \in H \quad (26)$$

- déplacement du bois (en tonnes.km) : c'est une mesure de l'activité de transport qui comptabilise les masses de bois et leur déplacement sur une période.

$$d(h) = \sum_{i,j,p} d_{ijp}(h)\delta_{ij} \quad h \in H \quad (27)$$

- makespan : stipule le nombre de périodes utilisées pour satisfaire la demande.

$$\hat{H} = \sum_{h \in H} t(h) \quad (28)$$

- nombre de fonds de pile ramassés : exprime le nombre de fonds de piles ramassés sur l'horizon de planification, qui influe sur l'activité de transport.

$$f = \text{card}(I_F) - \sum_{i \in I_F} f_i \quad (29)$$

- taux d'utilisation de la ressource de transport: c'est le taux d'exploitation de la capacité, obtenu en rapportant l'activité réalisée (en t.km) à la capacité agrégée (en t.km).

$$\tau(h) = \frac{1}{X(h)} \sum_{i,j,p} d_{ijp}(h)\delta_{ij} \quad h \in H \quad (30)$$

Le reliquat de capacité agrégée non mobilisée détermine la marge de capacité résiduelle :

$$\bar{\tau}(h) = 1 - \tau(h) \quad h \in H \quad (31)$$

3.6.2 Indicateurs de niveau opérationnel

- kilométrage global de la flotte : somme des distances parcourues sur la période, à vide et en charge, par une flotte de camions

$$\delta = \sum_{i,j,c,k} \delta_{ij} \times z_{ijc}(k) \quad (32)$$

- taux de charge moyen des camions : moyenne, pour l'ensemble des mouvements de la période, du taux de charge physique des camions

$$\rho = \frac{1}{KCW_c} \sum_{j,p,c,k} w_{j p c k} \quad (33)$$

- efficacité : indicateur rapportant le tonnage global livré au kilométrage global parcouru sur la période

$$e = \frac{1}{\delta} \sum_p m_p \quad (34)$$

3.7 Conclusion

Les modèles de décision présentés ont formulé une séquence hiérarchique de planification, tactique puis opérationnelle sous la forme de programmation linéaire en nombres mixtes (Moad et al, 2016). Les deux niveaux de planification s'effectuent sous contrainte de capacité et le lien entre ces deux modèles consiste en un calcul d'agrégation des capacités physiques de transport en capacités agrégées.

La scission du processus décisionnel en deux parties est motivée par plusieurs raisons :

- Minimiser, au niveau tactique, le volume d'activité à fournir pour répondre au carnet de commande, en recherchant une affectation judicieuse des sources aux clients. Ce n'est qu'au niveau opérationnel que l'on déterminera les modalités de réalisation du transport.
- Organiser au niveau tactique le plan de charge et confronter ce plan aux capacités de transport requises. Réserver les capacités de transport, internes et externes, en conséquence. En cas de période surcapacitaire, allouer les capacités marginales de transport à d'autres marchés.
- Découpler les aspects génériques de la planification des aspects qui sont spécifiques à une organisation logistique. Au niveau tactique en effet, la planification réalisée vise à orchestrer l'activité d'une entité logistique, sans préjuger de celle-ci. Ce n'est qu'au moment du passage du plan tactique au plan opérationnel que l'on prend en compte l'organisation spécifique en présence, en répartissant le plan de charge auprès des transporteurs en fonction de leur capacité respective.

Chapitre 4 : Analyse et optimisation d'un cas industriel

4 Analyse et optimisation d'un cas industriel

4.1 Introduction

Ce chapitre décrit la mise en œuvre, sur des données réelles issues d'un cas industriel, des modèles de décision proposés au chapitre 3, dans l'optique d'en valider l'applicabilité et d'évaluer les gains de productivité qui peuvent en découler. Pour ce faire, nous allons comparer les performances d'une activité observée au travers des données industrielles (scénario 'As-Is') aux performances qui auraient été produites par l'application de nos modèles de planification dans les mêmes conditions (scénarios 'To-Be').

Dans un premier temps, nous présentons le cas d'étude industriel, qui servira de support et de référence à nos analyses.

Puis, nous décrivons le protocole d'expérimentation par la définition des scénarios visant à évaluer les gisements de productivité énoncés dans le chapitre 3 : minimiser le déplacement de bois (exprimé en tonnes.km) en recourant dans la mesure du possible au retour en charge (routage circulaire). Conformément à notre approche d'optimisation multi-niveaux, nous mettons en œuvre une planification en cascade : tactique pour élaborer un plan de charge, puis opérationnelle pour déterminer les feuilles de route des chauffeurs.

Enfin, nous analysons comparativement les indicateurs de performance tactique et opérationnelle résultant des scénarios.

En conclusion, nous dressons un bilan des améliorations de performance résultant de l'application de nos modèles d'optimisation logistique, qui, certes, sont tributaires du cas traité, mais permettent aussi plus généralement de montrer l'intérêt d'une planification multi-niveaux en transport forestier.

4.2 Description et analyse du cas d'étude industriel

Le cas industriel qu'il nous a été donné d'observer concerne une entreprise d'exploitation forestière, possédant ses propres moyens de transport. Il va cependant nous permettre d'appliquer notre approche de *planification multi-niveaux dans un contexte mono-acteur et multi-produits*.

4.2.1 Principales données

Les données du problème de transport analysé sont les suivantes :

- Localisation des clients et demandes cumulées de bois sur une semaine de 5 jours (Tableau 4.1). Les commandes sont relatives à deux types de produit : bois d'industrie et bois d'œuvre. Ce jeu de données comporte 11 clients, principalement mais non exclusivement situés au Nord de l'Aquitaine (Figure 4.1),

- Localisation et niveaux des stocks bord de route en début de semaine (Tableau 4.2). Le jeu de données comporte 15 stocks bord de route. Ces points de chargement sont assez largement répartis sur le territoire régional (Figure 4.1),
- Flotte de transport : 5 camions de 37 tonnes de charge utile.

À partir des coordonnées GPS des points d'approvisionnement et de livraison, il nous a été possible de déterminer la matrice des distances routières entre ces points, à l'aide de MapPoint de Microsoft.

Tableau 4.1: Demandes cumulées par produit, sur 5 jours

Clients	Bois d'industrie t	Bois d'œuvre t
FIBRE EXCELLENCE SAINT GAUDENS (ST GAUDENS)	740	0
FINSA France (MORCENX)	74	0
FORESTIERE de GASCOGNE (ST SYMPHORIEN)	111	0
GARNICA PLYWOOD France (SAMAZAN)	296	0
GASPIN (DURANCE)	0	37
LACOSSE EMBALLAGES (MAUVEZIN SUR GUPIE)	74	0
MOURLAN (LAVAZAN)	0	111
PERE ET FILS (MARMANDE)	0	296
SCIERIE DE LERM (LERM ET MUSSET)	0	37
STEICO Casteljaloux (CASTELJALOUX)	74	0
TEMBEC TARTAS (TARTAS)	296	0

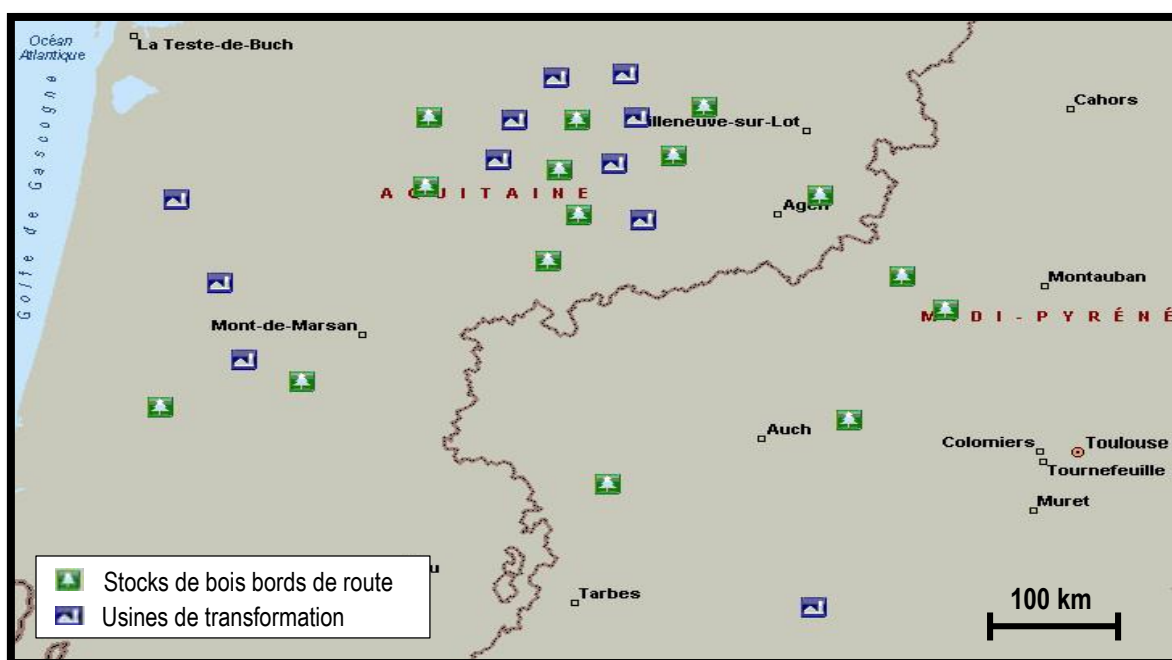


Figure 4.1: Cartographie des points d'approvisionnement et de livraison

Tableau 4.2: État initial des stocks par produit

Sources	Bois d'industrie t	Bois d'œuvre t
LERM ET MUSSET	0	4
DAX	13	0
SAUVIAC	37	0
HOUEILLES	74	0
CASTELMAYRAN	74	0
SAMAZAN	74	0
BRAX	97	0
AUDON	98	0
CASTELJALOUX	101	0
LAGRUERE	111	0
ST NICOLAS DE LA GRAVE	111	0
ST SAUVY	111	0
MARCIAC	222	0
VERTEUIL D AGENAIS	222	37
BOUSSES	431	440

4.2.2 Analyse de performance du cas industriel (scénario As-Is)

Nous présentons ici la performance logistique de l'activité de livraison réellement pratiquée par l'entreprise en réponse aux données décrites au paragraphe précédent. Dans cette entreprise, les responsables techniques élaborent chaque jour les feuilles de route pour le lendemain, et ce sans aide informatique. Les données mises à notre disposition relatent une semaine d'activité des chauffeurs, montrant les mouvements quotidiens des camions et la quantité de bois de chaque type (bois d'industrie et bois d'œuvre d'industrie) qui a été chargée et/ou livrée à chaque mouvement.

L'entreprise dispose d'un *dépôt*, qui est le point de départ et de retour journalier de tous les camions en début et en fin de tournée. Nous avons observé que, souvent, les camions reviennent en charge au dépôt en fin de journée, d'où ils repartent préchargés pour le lendemain. En d'autres termes, l'entreprise utilise le dépôt comme site de stockage. Nous avons saisi cette particularité dans le modèle tactique en considérant le dépôt comme une plateforme logistique.

Nous avons préalablement estimé la capacité agrégée de transport, exprimée en t.km, de l'entreprise pour chaque jour de la semaine (Tableau 4.3) par la relation (1) du chapitre 3. Dans ce jeu de données, la capacité agrégée journalière est constante d'un jour à l'autre. Nous retenons la valeur 46250 t.km. Pour la capacité agrégée journalière de l'entreprise, 9250 t.km par camion, sans considérer les aspects chronométriques.

Tableau 4.3: Capacité agrégée par jour

Période <i>h</i>	Nombre de camions disponibles <i>C(h)</i>	taux de charge moyen des camions <i>ρ</i>	Capacité physique <i>W</i>	kilométrage journalier <i>R</i>	Capacité agrégée <i>X(h)</i>
1	5	0,5	37	500	46 250
2	5	0,5	37	500	46 250
3	5	0,5	37	500	46 250
4	5	0,5	37	500	46 250
5	5	0,5	37	500	46 250

Puis, nous avons calculé les indicateurs de performance du scénario As-Is (Tableau 4.4) en appliquant les définitions introduites au §3.6.

Tableau 4.4: Performance du scénario As-Is

	Tonnage t	Kilométrage km	Déplacement de bois t.km	Taux de charge physique	Taux de charge agrégé	Efficienc t/km
Lundi	407	2 546	52 111	45%	1.13	0.16
Camion 1	74	494	10 892	40%	1.13	
Camion 2	74	690	12 571	40%	1.36	
Camion 3	111	395	7 533	48%	0.81	
Camion 4	74	686	12 257	40%	1.33	
Camion 5	74	279	8 858	50%	0.96	
Mardi	407	2 812	53 842	51%	1.16	0.14
Mercredi	407	2 753	52 994	50%	1.15	0.15
Jeudi	481	2 475	43 771	48%	0.95	0.19
Vendredi	444	2 125	45 257	50%	0.98	0.21
Global	2 146	12 710	247 975	49%	1.07	0.17

De ce tableau d'indicateurs propre au scénario As-Is, nous tirons quelques observations :

- une variabilité d'activité assez importante d'un jour à l'autre, tant du point de vue du tonnage livré (407 t lundi, 481 t jeudi) que du point de vue du déplacement de bois et du kilométrage,
- une variabilité d'activité très importante d'un chauffeur à l'autre (par ex. camion 3 et camion 4 lundi),
- un taux de charge physique moyen par mouvement proche de 50%, c'est-à-dire un déplacement sur deux à vide en moyenne, modulé à la hausse (mardi 51%) par l'existence de tournées de ramassage de fonds de pile et de retour en charge au dépôt, à la baisse (camion 1 lundi 40%) par le retour à vide au dépôt et le départ à vide qui s'ensuit le lendemain. Le taux de charge moyen de 49% pour l'ensemble de l'activité de la semaine corrobore l'idée d'un « plafond de verre » limitant le taux de charge physique (par mouvement) du transport forestier à environ $\rho=0.5$, ce qui justifie, en première approximation, la valeur que nous avons prise pour estimer la capacité agrégée de la flotte (Tableau 4.3).

- un taux de charge agrégée, souvent un peu supérieure à 100%, traduisant des dépassements de capacité nominale par surkilométrage ; ainsi le camion 2 a-t-il parcouru 690 km lundi, alors que la référence que nous avons prise pour le calcul de capacité agrégée est R=500 km.
- un indicateur global d'efficacité de l'activité de 0,17 t/km (170 kg/km), résultant des 12710km roulés pour 2 146 t de bois livré.

4.3 Optimisation multi-niveaux

Sur la base du jeu de données du scénario As-Is, nous avons mené une campagne d'évaluation de scénarios optimisés (scénarios To-Be) utilisant les modèles décisionnels de niveau tactique et opérationnel que nous avons détaillés au chapitre 3. A des fins de comparaison des performances, les différents scénarios ont été évalués par les mêmes indicateurs de performance. Les scénarios optimisés résultant de nos modèles en programmation linéaire ont été obtenus par l'utilisation du solveur CPLEX d'IBM, couplé à une interface EXCEL pour la saisie des données techniques et pour la restitution des indicateurs de performance résultant des variables de décisions optimisées par CPLEX.

Pour la prise en compte de l'utilisation du dépôt comme plateforme de stockage, nous avons adapté le modèle tactique présenté au §3.4 de la manière suivante :

Données

$\{Dep\}$ site dépôt

$W(h)$ $h < H$ limite de tonnage transférable au dépôt par période

Variables de décision

$DepIn_{ip}(h)$ $i \in I, p \in P, h < H$ tonnage en produit p entrant au dépôt en provenance du site i durant la période h

$DepOut_{jp}(h)$ $j \in J, p \in P, 1 < h < H$ tonnage en produit p sortant du dépôt à destination du site j durant la période h

$$DepIn_{ip}(h) = d_{ijp}(h) \quad i \in I, \quad j \equiv Dep, \quad p \in P, \quad h < H \quad (35)$$

$$DepOut_{jp}(h) = d_{ijp}(h) \quad j \in J, \quad i \equiv Dep, \quad p \in P, \quad 1 < h < H \quad (36)$$

$$\sum_j DepOut_{jp}(h) = \sum_i DepIn_{ip}(h-1) \quad p \in P, h > 1 \quad (37)$$

$$\sum_i DepIn_{ip}(h) \leq W(h) \quad h \in H \quad (38)$$

Les contraintes (35), (36) synchronisent les flux depuis/vers le dépôt et les flux de transport.

Par la contrainte (37), les sorties du dépôt en période h sont égales aux entrées au dépôt en période $h - 1$.

Enfin, la contrainte (38) limite à la valeur $W(h)$ le flux entrant au dépôt en période h .

Fonction objectif

Afin d'inciter l'optimiseur à retourner en charge au dépôt en fin de période, nous modifions au critère d'optimisation (8) en

$$Min (\alpha_1 J_1 + a_2 J_2 + a_3 J_3 - a_4 J_4) \quad (39)$$

avec

$$J_4 = \sum_{i \in I, p, h} DepIn_{ip}(h) \quad (40)$$

4.3.1 Plan d'expérimentation

Nous avons défini quatre scénarios d'optimisation multi-niveaux (tactique et opérationnelle), dont les performances seront comparées avec celles du scénario As-Is.

- Scénario 1 : planification multi-période avec lissage de charge,
- Scénario 2 : planification multi-période avec minimisation du makespan,
- Scénario 3 : planification unipériode avec approvisionnement dynamique des bords de route,
- Scénario 4 : planification unipériode avec approvisionnement statique des bords de route.

Ces scénarios sont décrits plus avant dans les paragraphes suivants.

4.3.1.1 Scénario 1 : planification multi-période avec lissage de charge

Ce scénario vise à uniformiser l'activité de transport d'une période à l'autre et entre camions d'une flotte. Cette pratique est intéressante pour une entreprise de transport qui, à l'instar de la PME constituant notre cas d'étude, cherche à répartir l'activité sur la semaine et entre ses chauffeurs salariés.

Nous réalisons une cascade de décisions optimisées en deux phases :

- Planification tactique : établir un plan multipériode, ici sur 5 jours, lissant la charge d'une période à l'autre. La charge est caractérisée par le déplacement de bois en t.km. Le lissage est réalisé en minimisant la somme des écarts de la charge de chaque période par rapport à la charge moyenne sur l'horizon. Par ailleurs, on incite le plan de charge à effectuer le ramassage des fonds de pile, ainsi qu'à rentrer en charge au dépôt, orientation tactique observée dans cette entreprise. Le plan optimal calculé prend la forme d'une matrice de transport pour chaque période, stipulant l'affectation des sources d'approvisionnement aux clients et les tonnages globaux à transférer pour chaque affectation.
- Planification opérationnelle : le plan de charge préalablement optimisé au niveau tactique détermine les intrants du problème d'optimisation du routage d'une flotte de camions. Au niveau opérationnel, on minimise le kilométrage global de la flotte, et, dans la mesure du possible, les déséquilibres de kilométrage individuel des camions par rapport au kilométrage moyen de la flotte. La planification opérationnelle optimise simultanément l'activité des 5 camions, en exploitant les possibilités de retour en charge, et produit les feuilles de route journalières correspondantes.

4.3.1.2 Scénario 2 : planification multi-période avec minimisation du makespan

Le terme Makespan désigne le temps nécessaire pour réaliser l'activité globale induite par un plan de charge. La politique est ici de réaliser un portefeuille de commandes de transport dans le temps le plus court, en vue i) d'exploiter au maximum les capacités de transport et ii) en situation sur-capacitaire, de dégager des marges de temps ou des ressources résiduelles qui permettront à l'entreprise de transport de prendre des marchés supplémentaires ou a contrario iii) en situation sous-capacitaire, d'évaluer les besoins de sous-traitance.

Le critère d'optimisation tactique combine la minimisation du déplacement global du bois (en t.km) avec la minimisation du makespan.

Puis, nous procédons à l'optimisation simultanée du routage des 5 camions, de manière identique au scénario 1, ce qui définit les feuilles de route pour chaque jour.

Dans ce jeu de données, la capacité agrégée journalière est constante d'un jour à l'autre.

4.3.1.3 Scénario 3 : planification unipériode avec approvisionnement dynamique

Ce troisième scénario prend en compte deux hypothèses : i) les stocks de bois en bord de route sont régénérés par des activités de coupe et de débardage pendant la campagne de transport et ii) le plan de transport est défini par une séquence d'optimisations mono-période.

Ces hypothèses permettent de synchroniser le plan de transport avec des données dynamiques de mise à disposition de bois. Par ailleurs, ce scénario est proche des pratiques observées dans notre cas d'étude, où les responsables techniques élaborent chaque jour les feuilles de route pour le lendemain, sur la base des stocks journaliers disponibles ou prévus comme tels.

Nous réalisons donc une séquence de 5 optimisations tactiques, alimentées chacune avec par un panier journalier (demandes et stocks offerts). Ici encore, le critère d'optimisation cherche à minimiser le déplacement global de bois (en t.km) et à vider les fonds de pile. Par contre, s'agissant d'optimisation monopériode, il n'y a pas d'incitation du retour en charge au dépôt, dû à la contrainte 21. Naturellement, les données initiales au jour h résultent des décisions optimisées au jour $h - 1$.

Au niveau opérationnel, on convertit ensuite la matrice de transport de chaque jour en une optimisation simultanée du routage des 5 camions sur un critère kilométrique.

4.3.1.4 Scénario 4 : planification unipériode avec approvisionnement statique

La particularité de ce scénario réside dans la constitution des stocks bord de route, réputés disponibles en début d'horizon de planification. Les stocks ne sont pas réalimentés pendant l'horizon du plan de transport. Les autres caractéristiques du scénario 4 sont identiques à celles du scénario 3 : on procède à une séquence de 5 planifications au niveau tactique, et l'on transforme chaque plan journalier en un problème d'optimisation opérationnelle générant simultanément les feuilles de route des 5 camions.

4.3.2 Résultats et analyse

Nous présentons ici les résultats des quatre scénarios de décision To-Be, appliqués au même jeu de données (même demande en bois de construction et en bois d'œuvre, mêmes stocks bord de route, même réseau routier) issu du cas d'étude et les analysons au travers du même jeu d'indicateurs de performance. Les résultats de l'optimisation tactique des scénarios sont présentés ensemble, suivis des résultats groupés de l'optimisation opérationnelle correspondant à ces mêmes scénarios.

4.3.2.1 Analyse des scénarios de planification tactique

Un plan tactique est calculé pour chaque scénario 1 à 4 en utilisant le modèle présenté dans le chapitre 3 (§ 3.4).

L'optimisation tactique est faite sous des contraintes de capacité agrégée de transport (Tableau 4.3) de la flotte, évaluée à 46250 t.km chaque jour.

Nous présentons d'abord les résultats globaux relatifs à chaque scénario (Tableau 4.4), qui tous réalisent la totalité des livraisons, à hauteur de 2146t dans la semaine.

Tableau 4.5: Performance comparée des scénarios

Scénarios	Makespan Nbre de périodes	Transfert au dépôt t	Déplacement de bois t.km	Taux de charge agrégé	Capacité résiduelle
Scénario To-Be 1	5	629	164 140	71%	29%
Scénario To-Be 2	4	74	162 749	70% (88%)	30% (12%)
Scénario To-Be 3	5	0	168 390	73%	27%
Scénario To-Be 4	5	0	167 002	72%	28%

Selon ces résultats, les 4 scénarios optimisés apparaissent significativement plus performants que le scénario As-Is en termes de minimisation de déplacement de bois et dégagent une marge capacitaire d'environ 30% qui peut être affectée à d'autres affaires.

Le scénario 2 minimise le makespan en proposant un plan de transport finalisé en 4 jours seulement et par la même occasion est le meilleur scénario en déplacement de bois, avec 162749 t.km. La capacité agrégée est ici mobilisée à 70% (capacité comptée sur 5 jours), en réalité 87,5% ramenée sur 4 jours, ce qui traduit le meilleur taux d'exploitation de la capacité de transport.

Le scénario 1, qui se justifie par une politique de lissage de charge sur la semaine, conduit à des résultats assez proches. Néanmoins, le modèle a généré davantage de retours en charge au dépôt, ce qui grève sensiblement le bilan de déplacement de bois.

Les scénarios 3 et 4 conduisent fatalement à un bilan dégradé en termes de déplacement global de bois ; en effet une séquence de décisions journalières est sous-optimale par rapport à une optimisation globale sur l'ensemble des jours de la semaine. Néanmoins, ces scénarios peuvent être justifiés par un accès aux données (notamment sur les niveaux des stocks bord de route) au jour le jour.

Les détails par période des plans optimisés apparaissent pour chaque scénario dans les tableaux 4.6 à 4.9.

Le scénario 1 a proposé un lissage parfait de la charge, exploitant la ressource agrégée de transport à un niveau constant de 71% chaque jour. Le scénario 2 a, quant à lui, trouvé un plan de charge en 4 jours, conduisant à une exploitation maximale du taux de charge journalier. Compte tenu du jeu de contraintes en présence, il n'est toutefois pas possible d'exploiter 100% de la capacité de transport journalière, excepté le jour 4.

Tableau 4.6: Scénario 1, plan de charge tactique par période

	Tonnage t	Transfert au dépôt t	Ramassage des fonds de pile	Déplacement de bois t.km	Taux de charge agrégé	Capacité agrégée résiduelle
Période 1	370	185	0	32 828	71%	29%
Bois d'industrie	370	0	0	29 186	63%	
Bois d'œuvre	0	185	0	3 642	8%	
Période 2	370	185	0	32 828	71%	29%
Bois d'industrie	185	111	0	26 992	58%	
Bois d'œuvre	185	74	0	5 836	13%	
Période 3	481	74	1	32 828	71%	29%
Bois d'industrie	407	37	1	30 733	66%	
Bois d'œuvre	74	37	0	2 095	5%	
Période 4	370	185	0	32 828	71%	29%
Bois d'industrie	333	74	0	29 754	64%	
Bois d'œuvre	37	111	0	3 074	7%	
Période 5	555	0	1	32 828	71%	29%
Bois d'industrie	370	0	0	28 812	62%	
Bois d'œuvre	185	0	1	4 016	9%	
Performance globale	2 146	629	2	164 140	71%	29%
Bois d'industrie	1 665	407	1	145 478	63%	
Bois d'œuvre	481	222	1	18 663	8%	

Tableau 4.7: Scénario 2, plan de charge tactique multi-périodes

	Tonnage t	Transfert au dépôt t	Ramassage des fonds de pile	Déplacement de bois t.km	Taux de charge agrégé	Capacité agrégée résiduelle
Période 1	555	0	0	35 624	77%	23%
Bois d'industrie	370	0	0	27 419	59%	
Bois d'œuvre	185	0	0	8 205	18%	
Période 2	555	0	0	41 676	90%	10%
Bois d'industrie	555	0	0	41 676	90%	
Période 3	481	74	1	39 200	85%	15%
Bois d'industrie	333	0	1	32 494	70%	
Bois d'œuvre	148	74	0	6 706	15%	
Période 4	555	0	1	46 250	100%	0%
Bois d'industrie	407	0	0	43 109	93%	
Bois d'œuvre	148	0	1	3 141	7%	
Performance globale	2 146	74	2	162 749	70%	30%
Bois d'industrie	1 665	0	1	144 697	63%	
Bois d'œuvre	481	74	1	18 052	7%	

Enfin, les scénarios 3 et 4, qui affectent au jour le jour les sources d'approvisionnement aux clients, se soldent par un déplacement de bois plus important et ne maîtrisent pas les fluctuations de charge (de 49% à 85% pour le scénario 3, de 47% à 86% pour le scénario 4).

Tableau 4.8: Scénario 3, plan de charge tactique multi-périodes

	Tonnage t	Transfert au dépôt t	Ramassage des fonds de pile	Déplacement de bois t.km	Taux de charge agrégé	Capacité agrégée résiduelle
Période 1	407	0	0	33 918	73%	27%
Bois d'industrie	296	0	0	29 250	63%	
Bois d'œuvre	111	0	0	4 668	10%	
Période 2	407	0	1	39 221	85%	15%
Bois d'industrie	333	0	0	36 306	78%	
Bois d'œuvre	74	0	1	2 915	6%	
Période 3	407	0	0	36 660	79%	21%
Bois d'industrie	333	0	0	35 271	76%	
Bois d'œuvre	74	0	0	1 389	3%	
Période 4	481	0	0	36 076	78%	22%
Bois d'industrie	333	0	0	30 281	65%	
Bois d'œuvre	148	0	0	5 795	13%	
Période 5	444	0	1	22 515	49%	51%
Bois d'industrie	370	0	1	19 233	42%	
Bois d'œuvre	74	0	0	3 282	7%	
Performance globale	2 146	0	2	168 390	73%	27%
Bois d'industrie	1 665	0	1	150 340	65%	
Bois d'œuvre	481	0	1	18 050	8%	

Tableau 4.9: Scénario 4, plan de charge tactique multi-périodes

	Tonnage t	Transfert au dépôt t	Ramassage des fonds de pile	Déplacement de bois t.km	Taux de charge agrégé	Capacité agrégée résiduelle
Période 1	407	0	1	21 623	47%	53%
Bois d'industrie	296	0	0	17 590	38%	
Bois d'œuvre	111	0	1	4 033	9%	
Période 2	407	0	1	29 008	63%	37%
Bois d'industrie	333	0	1	25 981	56%	
Bois d'œuvre	74	0	0	3 027	7%	
Période 3	407	0	0	39 588	86%	14%
Bois d'industrie	333	0	0	37 675	81%	
Bois d'œuvre	74	0	0	1 913	4%	
Période 4	481	0	0	39 032	84%	16%
Bois d'industrie	333	0	0	33 237	72%	
Bois d'œuvre	148	0	0	5 795	13%	
Période 5	444	0	0	37 752	82%	18%
Bois d'industrie	370	0	0	34 470	75%	
Bois d'œuvre	74	0	0	3 282	7%	
Performance globale	2 146	0	2	167 002	72%	28%
Bois d'industrie	1 665	0	1	148 952	64%	
Bois d'œuvre	481	0	1	18 050	8%	

4.3.2.2 Planification opérationnelle

En appliquant le modèle d'optimisation du routage présenté dans le chapitre 3 (§ 3.5), la faisabilité du plan tactique est testée au niveau opérationnel, où les mouvements précis de chaque camion sont définis en tenant compte de leur capacité physique.

La capacité opérationnelle de transport est fixée, pour chaque jour de la semaine, à 5 camions de charge utile 37 tonnes chacun.

Les solutions trouvées par le modèle d'optimisation de routage pour chaque scénario To-Be sont présentées dans les tableaux 4.10 à 4.13. A titre d'exemple, l'activité du camion 1 est détaillée mouvement par mouvement dans la période 1.

Ces résultats montrent que :

- i) les plans tactiques des scénarios To-Be se sont tous révélés faisables au niveau opérationnel, réalisant l'intégralité des transferts de bois stipulés par le niveau tactique dans chaque période. Nous en concluons que l'évaluation que nous avons initialement faite de la capacité agrégée était réaliste.
- ii) les 5 camions ont été utilisés dans tous les scénarios, car ce paramètre était fixe dans nos modèles d'optimisation. S'il avait fallu minimiser le nombre de camions, tout en restant par exemple dans une politique de minimisation du makespan, les résultats du scénario 2 semblent indiquer que les 10 992 km requis pour réaliser le plan de transport en 4 jours et 5 camions, soit 549 km par camion et par jour en moyenne, puissent être réalisés en 5 jours par 4 camions. Néanmoins, il conviendrait de vérifier la faisabilité d'un tel scénario en utilisant le modèle d'optimisation du routage avec ce nouveau paramétrage.
- iii) le kilométrage global parcouru par la flotte est significativement plus faible dans les quatre scénarios To-Be que dans le scénario As-Is, ce que nous imputons essentiellement à la minimisation du déplacement de bois par le plan tactique. Au global, l'efficacité de l'activité opérationnelle est significativement supérieure à celle constatée dans le scénario As-Is.
- iv) en définitive, les scénarios 1 et 2, qui répondent à des politiques de gestion différentes (lissage de charge vs minimisation du makespan) confirment leur performance. On peut noter que le scénario 1 présente un meilleur taux moyen de charge des camions par mouvement, mais ceci résulte d'un fréquent retour en charge au dépôt, qui conduit à des déplacements 'inutiles' du bois. Ce que confirme le bilan de déplacement global du bois, qui, avec 170 028 t.km, est moins bon que pour le scénario 2.
- v) enfin, les scénarios 3 et 4 s'avèrent moins performants, héritant d'une moins bonne initialisation du problème au niveau tactique.

Tableau 4.10: Scénario 1, performances du routage opérationnel par période

	Tonnage	Distance	Déplacement de bois	Taux de charge physique	Nombre de mouvements	Efficienne
	t	km	ton.km			ton/km
Période 1	555	2 618	35 591	52%	35	0,21
Camion 1	111	561	7 640	50%	6	0,20
Mouvement 1	0	107	0	0%		0
Mouvement 2	37	101	3722	100%		0,37
Mouvement 3	0	86	0	0%		0,00
Mouvement 4	37	87	3203	100%		0,43
Mouvement 5	0	162	0	0%		0
Mouvement 6	37	19	715	100%		1,92
Camion 2	111	499	7 096	51%	8	0,22
Camion 3	111	504	5 697	47%	7	0,22
Camion 4	148	536	6 786	50%	8	0,28
Camion 5	74	519	8 371	61%	6	0,14
Période 2	555	2 168	34 509	62%	28	0,26
Période 3	555	2 425	34 554	52%	31	0,23
Période 4	555	1 955	32 050	54%	30	0,28
Période 5	555	2 336	33 324	52%	33	0,24
Performance globale	2 775	11 502	170 028	54%	157	0,24

Tableau 4.11: Scénario 2, performances du routage opérationnel par période

	Tonnage	Distance	Déplacement de bois	Taux de charge physique	Nombre de mouvements	Efficienne
	t	km	ton.km			ton/km
Période 1	555	2 184	35 711	43%	36	0,25
Camion 1	111	386	7 331	43%	7	0,29
Mouvement 1	0	13	0	0%		0
Mouvement 2	37	109	4 049	100%		0,34
Mouvement 3	0	104	0	0%		0
Mouvement 4	37	44	1641	100%		0,83
Mouvement 5	0	45	0	0%		0
Mouvement 6	37	44	1641	100%		0,83
Mouvement 7	0	26	0	0%		0
Camion 2	111	297	3 402	42%	8	0,37
Camion 3	111	219	3 935	43%	7	0,51
Camion 4	111	460	7 217	43%	7	0,24
Camion 5	111	822	13 827	43%	7	0,14
Période 2	555	3 078	41 978	43%	37	0,18
Période 3	555	2 764	40 645	46%	35	0,20
Période 4	555	2 967	46 266	43%	36	0,19
Performance globale	2 220	10 992	164 601	43%	144	0,20

Tableau 4.12: Scénario 3, performances du routage opérationnel par période

	Tonnage	Distance	Déplacement de bois	Taux de charge physique	Nombre de mouvements	Efficienne ton/km
	t	km	ton.km			
Période 1	407	2 180	33 312	41%	28	0,19
Camion 1	74	407	4 589	40%	5	0,18
Mouvement 1	0	102	0	0%		0
Mouvement 2	37	87	3 203	100%		0,43
Mouvement 3	0	162	0	0%		0
Mouvement 4	37	37	1 386	100%		0,99
Mouvement 5	0	19	0	0%		0
Camion 2	74	601	9 105	40%	5	0,12
Camion 3	111	414	7 634	43%	7	0,27
Camion 4	37	467	6 403	34%	4	0,08
Camion 5	111	290	5 580	43%	7	0,38
Période 2	407	2 808	41 793	42%	32	0,14
Période 3	407	2 378	38 058	42%	29	0,17
Période 4	481	2 239	36 076	42%	31	0,21
Période 5	444	1 747	24 404	42%	31	0,25
Performance globale	2 146	11 351	173 643	42%	151	0,19

Tableau 4.13: Scénario 4, performances du routage opérationnel par période

	Tonnage	Distance	Déplacement de bois	Taux de charge physique	Nombre de mouvements	Efficienne ton/km
	t	km	ton.km			
Période 1	407	2244	21 660	42%	28	0,18
Camion 1	111	324	1563	43%	7	0,34
Mouvement 1	0	109	0	0%		0
Mouvement 2	37	6	223	100%		6,15
Mouvement 3	0	6	0	0%		0
Mouvement 4	37	6	223	100%		6,15
Mouvement 5	0	141	0	0%		0
Mouvement 6	37	30	1117	100%		1,23
Mouvement 7	0	26	0	0%		0
Camion 2	37	458	3 722	33%	3	0,08
Camion 3	74	612	6 406	40%	5	0,12
Camion 4	111	424	4 935	43%	7	0,26
Camion 5	74	427	5 034	48%	6	0,17
Période 2	407	2343	29 181	41%	28	0,17
Période 3	407	2363	39 588	41%	27	0,17
Période 4	481	2394	41 264	43%	33	0,20
Période 5	444	2287	37 761	42%	30	0,19
Performance globale	2 146	11 631	169 452	42%	146	0,18

4.4 Conclusions

Ce chapitre a présenté les résultats d'une analyse comparée des performances de scénarios de transport autour d'un même cas d'étude industriel en région Aquitaine. Dans ce cas d'étude, le transport est organisé la veille pour le lendemain, directement dans ses modalités opérationnelles (établissement des tournées et élaboration des feuilles de route destinées aux chauffeurs).

Le jeu de données, qui nous a été aimablement transmis par l'entreprise, nous a permis de reconstituer l'activité de transport d'une flotte de camions sur plusieurs jours et de cerner les pratiques du transport de bois en milieu PME. Nous avons caractérisé la performance logistique du scénario réel par les indicateurs de performance de niveau opérationnel définis au chapitre 3 (taux de charge moyen des camions, kilométrage, efficience). Le bilan de déplacement de bois (en t.km) a ici été établi a posteriori. Nous avons observé que le déplacement effectif de bois n'est pas utilisé par l'entreprise comme variable décisionnelle pour l'organisation du transport, mais sert pourtant de base à la facturation du transport.

Puis, nous avons appliqué nos modèles d'optimisation au jeu de données du cas industriel, par une approche multi-niveaux consistant :

- i) au niveau tactique, à calculer un plan agrégé d'activité selon un critère principal de minimisation du déplacement du bois (en t.km), sous contrainte de capacité agrégée de transport de la flotte globalement considérée. Il en ressort une allocation journalière des sources (stocks bord de route) aux destinations (clients à livrer), ainsi que les volumes globaux à transférer,
- ii) au niveau opérationnel, à déterminer le routage de chaque camion et les volumes de chargement/déchargement correspondant à chaque manipulation de bois. Ici, le critère principal est la minimisation du kilométrage global de la flotte, sous contrainte de capacité physique des camions.

L'exploitation des résultats nous permet de tirer la liste de conclusions ci-dessous :

Gain en performance : comme nous nous y attendions, les plans de transport qui s'appuient sur les modèles d'optimisation se sont révélés, au travers des mêmes indicateurs de performance, significativement meilleurs que le scénario réellement pratiqué, qui résultait d'une planification manuelle. Nous attribuons essentiellement ce gain à la minimisation du déplacement de bois par l'optimisation tactique préalable.

Intérêt du raisonnement tactique : l'intérêt de l'optimisation tactique que nous promovons dans notre modélisation multi-niveaux est également de permettre à l'entreprise de maîtriser sa politique de gestion. Le lissage de charge ou la réalisation du plan de transport en temps minimal, que nous avons choisi prioritairement d'évaluer, constituent des politiques courantes relevant bien de la gestion d'entreprise au niveau tactique.

De l'élaboration du plan tactique de transport, il ressort en effet une estimation du taux d'exploitation des ressources de transport disponibles, internalisées et/ou externalisées, ce qui constitue la base du raisonnement pour adapter la capacité de transport au plan de charge. Sur cette base, il est possible de programmer le recours à un complément externe de capacité transport si la capacité interne semble être insuffisante pour certaines périodes, a contrario une surcapacité interne constatée sur certaines périodes permet d'envisager des commandes de transport supplémentaires, voire de proposer les capacités de transport résiduelles de l'entreprise à des prestataires extérieures.

Interfaçage avec la planification des coupes : la définition du scénario 3 nous a permis de formaliser le couplage de la planification du transport avec des données exogènes de régénération journalière des stocks bord de route. Ce couplage ouvre la voie à une optimisation globale et simultanée des coupes et du transport, en vue d'une planification intégrée des approvisionnements.

Validation du plan de charge : de toute évidence, le plan de charge tactique doit être validé par la vérification du plan opérationnel correspondant à chaque période, en tenant compte des contraintes de ce niveau (capacité physique des camions, taille de la flotte, kilométrage admissible par période pour chaque camion). L'interface entre les niveaux de décision tactique et opérationnel réside dans l'expression de la capacité agrégée d'une flotte, cf. relation (1), en fonction des capacités opérationnelles. De notre point de vue, le réglage de cette relation par les valeurs R (moyenne inter-camions du kilométrage maximal admissible par période) et ρ (taux de charge moyen par mouvement) doit prendre en compte empiriquement les statistiques d'activité de l'entreprise. A défaut, on posera $\rho = 0.5$ qui correspond à un mouvement sur deux à vide en moyenne.

Pour tous les scénarios que nous avons déroulés, les plans optimisés au niveau tactique se sont avérés faisables au niveau opérationnel, caractérisant donc une estimation prudente des capacités agrégées. Dans le cas contraire, une estimation exagérément optimiste des capacités agrégées expose au risque de calculer un plan de charge tactique non complètement réalisable au niveau opérationnel. Dans ce cas, il convient de reprendre le plan tactique en restreignant la capacité agrégée, ce qui conduira l'optimiseur tactique à produire un plan de charge moins ambitieux, et ce jusqu'à constater la faisabilité du plan de transport au niveau opérationnel.

Temps de calcul du plan de transport : pour ce qui concerne le temps de calcul de nos modèles d'optimisation appliqués aux différents scénarios, réalisés sous CPLEX d'IBM sur un PC de bureau, il ne faut que quelques secondes pour optimiser les plans tactiques dans nos conditions expérimentales (15 stocks en forêt, 11 clients, deux types de produit, 5 périodes). Par contre, le temps de calcul du plan opérationnel, nécessaire pour chaque période du plan tactique, est très important, en raison principalement de l'explosion combinatoire des variables de décision du modèle de programmation linéaire en nombres mixtes (avec variables binaires) induit par notre

modèle de décision opérationnelle. Nous avons limité à 15 mn les temps de calcul pour la résolution du problème de routage pour une journée. Dans ce délai, nous avons obtenu à chaque fois une solution faisable, mais pas toujours optimale.

Ce chapitre a rendu compte de l'application de notre approche multi-niveaux de planification du transport forestier sur la base d'un cas réel de référence, de type mono-acteur. Ce cas d'étude illustre propre à une entreprise autonome cumulant les fonctions d'exploitant forestier (négoce du bois) et de transport par ses ressources propres.

En réalité, nos modèles optimisent une logistique de transport sans préjuger de la propriété des capacités de transport qui sont exploitées. Nous considérons que les deux niveaux de décision tactique et opérationnelle constituent des fonctions invariantes du pilotage d'une organisation de logistique forestière quelle qu'elle soit, et que ces fonctions génériques peuvent être mises en œuvre dans des organisations de tout type, mono ou multi-acteurs.

C'est l'objet du dernier chapitre que d'appliquer nos modèles de décision à des contextes multi-acteurs collaboratifs simples et de comparer, cette fois-ci sur la base de cas d'école, les performances logistiques qui s'y rattachent.

Chapitre 5 : vers une organisation collaborative du transport forestier

5 Vers une organisation collaborative du transport forestier

5.1 Introduction

Les analyses présentées dans le chapitre précédent ont vérifié l'applicabilité du modèle multi-niveaux de décision à un cas réel mono-acteur. Les résultats ont confirmé l'apport des techniques d'optimisation à l'efficacité du transport du point de vue strictement logistique, sans préjuger des facteurs économiques ou stratégiques, lesquels n'ont pas été investigués dans notre recherche.

Au-delà de l'application intra-entreprise relatée dans le chapitre 4, nous portons ici notre attention sur la variabilité des organisations logistiques dans lesquelles nos modèles de pilotage doivent pouvoir s'immerger. Nous formulons ci-après les observations qui nous ont conduits à explorer différents contextes de pilotage logistique :

- Les gains de productivité issus d'une optimisation logistique sont fonction du périmètre d'activité couvert. Plus le réseau d'activité est vaste (nombre de clients, nombre de points d'approvisionnement, capacités de transport mobilisables), plus les degrés de liberté des variables de décision sont importants et plus la solution optimale est efficace. A contrario, l'explosion de la complexité du problème d'optimisation opérationnelle du transport est telle qu'il conviendra de se satisfaire de solutions faisables plutôt qu'optimales. Un sujet corollaire est la pertinence du périmètre géographique de la chaîne d'approvisionnement, notamment, le positionnement relatif des bassins d'approvisionnement et de livraison, plus ou moins favorable aux tournées circulaires et aux retours en charge.
- La configuration du réseau d'acteurs concourant à une chaîne d'approvisionnement est diverse, selon la multiplicité des acteurs et les fonctions (exploitation forestière et/ou transport) mises en œuvre par ces acteurs dans le processus d'approvisionnement.
- Les corrélations entre performances locales vues par chaque acteur et performances globales de la chaîne d'approvisionnement constituent à l'évidence un élément important de stratégie industrielle et de pérennisation de la filière. Les chaînes d'approvisionnement basées sur un partenariat explicite entre acteurs doivent donc pouvoir être évaluées conjointement au niveau global et au niveau de chaque entreprise partenaire.
- L'organisation du pilotage d'une chaîne logistique peut différer de l'organisation fonctionnelle du processus d'approvisionnement. Dans une organisation traditionnelle «*peer to peer*», des acteurs indépendants interagissent uniquement par leurs transactions commerciales et par le flux physique, sous contrôle d'un pilotage autonome de l'activité de chaque acteur. A contrario, dans une organisation collaborative, le pilotage de l'activité des acteurs peut être externalisé vers un intégrateur logistique orchestrant l'activité des acteurs, ou être confié à l'un des acteurs ayant mandat pour piloter la chaîne d'approvisionnement.

Dans ce chapitre, nous utilisons le même jeu de données d'origine industrielle qu'au chapitre 4, mais en immergeant ce jeu de données dans différents contextes de collaboration, donc de mutualisation des données et des contraintes du problème de pilotage. Nous définissons une gradation des niveaux de mutualisation des activités, allant de l'autonomie totale des acteurs à la mutualisation intégrale des marchés et des ressources de transport, et évaluons comparativement les performances locales et globales résultant de ces scénarios. Pour ce faire, nous utilisons notre modèle d'optimisation au niveau tactique uniquement, l'optimisation opérationnelle nous ayant semblé peu pertinente pour cette étude; en effet, nous plaçons ici l'emphase entre le niveau tactique (planification des activités) et le niveau stratégique (performance attendue d'un partenariat logistique).

5.2 Évaluation comparée de scénarios collaboratifs et non collaboratifs

Afin de mettre en évidence les gains de performance qui peuvent être attendus de différents rapports de collaboration entre acteurs d'une chaîne logistique, nous avons défini et analysé différents scénarios collaboratifs et non collaboratifs sur un jeu de données commun. En réalité, nous avons considéré le jeu de données issu du cas industriel traité au chapitre 4, en répartissant cette activité sur deux acteurs et en explorant une variété de rapports collaboratifs entre ces deux acteurs. Ce faisant, nous avons pu établir quantitativement et dans des temps de calcul raisonnables les performances optimales fournies par notre modèle de planification tactique sous CPLEX.

Nous allons d'abord présenter les différents scénarios collaboratifs et non collaboratifs, puis présenter les performances correspondantes par les principaux indicateurs de niveau tactique : déplacement de bois, taux d'exploitation des capacités de transport. Enfin, l'analyse des résultats comparatifs amènera nos conclusions.

5.2.1 Définition des scénarios

Nous considérons la répartition géographique des stocks et des clients ainsi que les volumes de commande caractérisant le cas d'étude industriel (Figure 4.1) et nous répartissons l'activité induite de transport sur deux entreprises, caractérisées chacune (Figure 5.1) par un bassin d'approvisionnement, un bassin de livraison et une flotte de camions définissant une capacité agrégée de transport. En l'absence de collaboration, le plan de charge de chacune des deux entreprises est réalisé indépendamment à partir des données qui leur sont propres. En situation collaborative, le plan de charge de l'organisation partenariale est élaboré par un unique pilotage logistique, puis l'activité est répartie sur chaque partenaire. Nous analysons les performances locales des deux entreprises, ainsi que la performance globale de l'activité partenariale, pour chacune des modalités de collaboration suivantes :

- Scénario *non collaboratif* : les deux entreprises gèrent leur activité de façon autonome, sur la base de leur propre clientèle, de leurs propres sources d’approvisionnement et de leurs ressources privées de transport. C’est le degré zéro du partenariat. Nous avons analysé plusieurs scénarios non collaboratifs différant par la disposition relative des bassins d’approvisionnement et de livraisons de chaque entreprise,
- Scénario *collaboratif* mutualisant les *stocks* : les entreprises s’entendent sur l’accès à la ressource bois, tandis que leurs clients et leurs ressources de transport demeurent privés. Les sources de bois sont donc partagées,
- Scénario *collaboratif* mutualisant les *demandes* : les entreprises mettent en commun leur panel de commandes, mais leurs stocks et leurs ressources de transport demeurent privés. Les demandes des clients sont donc partagées,
- Scénario *collaboratif intégral* : les entreprises mutualisent les commandes, les stocks et les ressources de transport. C’est le degré de partenariat le plus élevé.

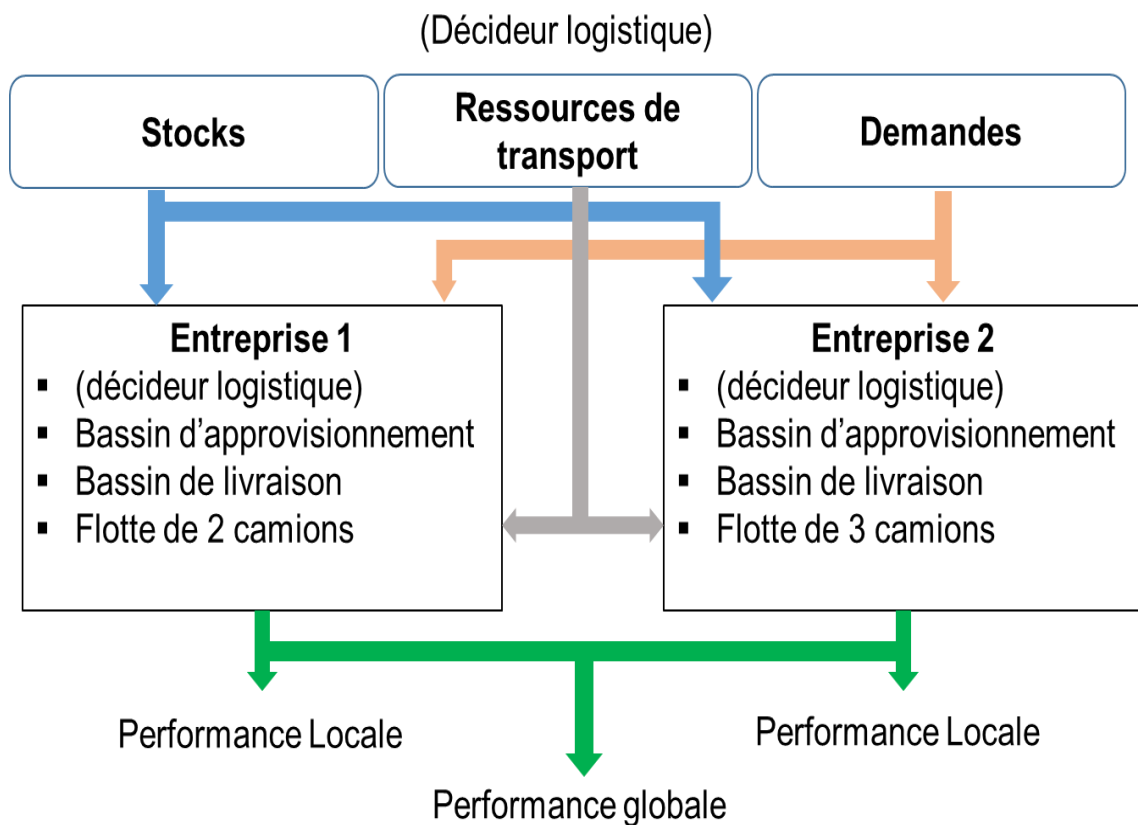


Figure 5.1: Contextualisation des scénarios collaboratifs et non collaboratifs

Nous passons du cas mono-acteur traité au chapitre 4 au cas multi-acteurs (ici limité à deux acteurs) en répartissant les capacités de transport sur deux entreprises :

- l'entreprise 1 dispose d'une capacité agrégée correspondant à 2 camions,
- l'entreprise 2 dispose d'une capacité agrégée correspondant à 3 camions.

Pour le reste, les modalités des scénarios étudiés ici sont communes avec celles du cas étudié au chapitre 4 :

- mêmes données (Figure 4.1) : réseau de 15 stocks et de 11 clients, mêmes niveaux de stock, même demande globale de 1665t de bois d'œuvre (produit P1) et 481t de bois d'industrie (produit P2),
- mêmes variables de décision : allocation des sources de bois aux clients, plan de transport multi-période,
- même fonction objectif d'optimisation : minimiser le déplacement de bois (t.km), minimiser le Makespan, vider les fonds de pile,
- indicateurs de performance : locaux (pour chaque entreprise) et globaux (chaîne d'approvisionnement) : bilans de déplacement de bois, taux d'exploitation des capacités

5.2.2 Scénarios non collaboratifs

Dans un contexte Peer-to-Peer, chaque entreprise gère son propre portefeuille de stocks, demandes et ressources de transport, suivant sa propre politique de gestion, et ce de manière autonome. Les flux physiques (stocks, demandes et ressources) sont indépendants.

5.2.2.1 *Gestion non collaborative : zones d'activités disjointes*

Dans ce scénario, les deux entreprises opèrent sur des zones géographiques disjointes ou quasi-disjointes (Figure 5.2), tant en ce qui concerne le bassin d'approvisionnement que le bassin de livraison : L'entreprise 1 opère au Nord de la région, tandis que l'entreprise 2 opère au Sud de la région.

Les niveaux de stocks et les commandes vus par chaque acteur sont indiqués sur la Figure 5.2.

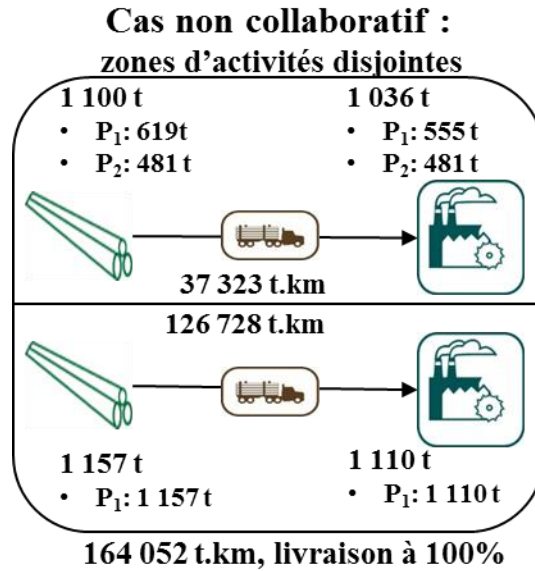


Figure 5.2: Gestion non collaborative : zones d'activités disjointes

En procédant séparément à l'optimisation tactique du transport des deux entreprises, nous avons obtenu une solution optimale honorant les commandes pour chacune des entreprises, dont les stocks et les capacités de transport s'avèrent donc suffisants. Néanmoins, en dépit d'un volume global de bois transporté similaire (Figure 5.2), le bilan de déplacement de bois vu par l'entreprise 2 est considérablement plus élevé que le bilan vu par l'entreprise 1, en raison de la configuration géographique des bassins d'activité.

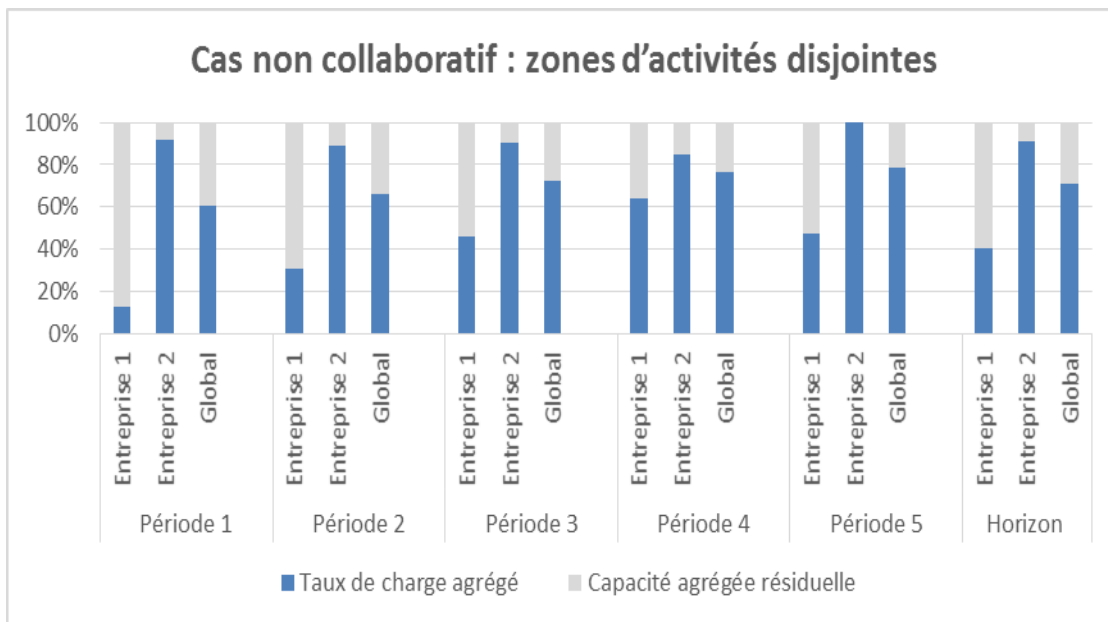


Figure 5.3: Gestion non collaborative : zones d'activités disjointes ; plans de charge

Sur les plans de charge optimaux obtenus (Figure 5.3), il apparaît un makespan de 5 périodes. Il existe un fort déséquilibre dans le taux d'exploitation (taux de charge agrégée) des capacités de transport, à hauteur de 40%

sur l'ensemble du plan pour l'entreprise 1 et de 92% pour l'entreprise 2. Ces disparités sont encore plus marquées sur certaines périodes : un taux de charge de 10% seulement pour l'entreprise 1 en première période, saturation des capacités de transport pour l'entreprise 2 en période 5. Globalement et sur tout l'horizon, la capacité de transport mobilisée n'est exploitée qu'à hauteur de 70% et laisse donc des marges disponibles de 30%.

5.2.2.2 Gestion non collaborative : zones d'activités interpénétrantes

Nous considérons ici une configuration où les zones d'activités des deux entreprises sont inter-pénétrantes (Figure 5.4) : L'entreprise 1 s'approvisionne majoritairement au Nord pour livrer au Sud, tandis que l'entreprise 2 s'approvisionne majoritairement au Sud pour livrer au Nord.

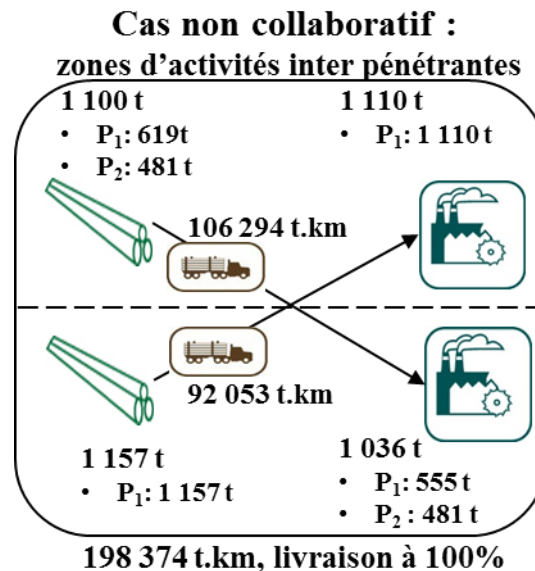


Figure 5.4: Gestion non collaborative : zones d'activités interpénétrantes ; bassins d'activité

Les niveaux de stocks et les commandes vus par chaque acteur sont indiqués sur la Figure 5.4, ainsi que les bilans d'activité établis indépendamment par les deux entreprises. Ici encore, la faisabilité des plans de livraison de chacune des deux entreprises est avérée. Comme on peut s'y attendre, la configuration géographique étudiée est, pour un même service global de livraison, catastrophique en termes de bilan global de déplacement de bois, qui grimpe à 198 374 t.km, en raison de l'éloignement des bassins d'approvisionnement et de distribution. Dans le même temps, l'activité de l'entreprise 1 est en forte hausse, celle de l'entreprise 2 est en baisse.

Si l'on considère les plans de charge des entreprises (Figure 5.5), le makespan est à nouveau de 5 périodes pour l'activité globale, de 4 périodes seulement pour l'entreprise 1. Chaque période est très chargée, en raison de l'augmentation générale de déplacement de bois par rapport au scénario précédent. La capacité agrégée de

transport est globalement sollicitée à hauteur de 80%, et quasiment à 100% dans les périodes 2 et 3. Ce scénario est caricatural, vise à montrer l'influence des bassins d'activité sur la productivité de transport.

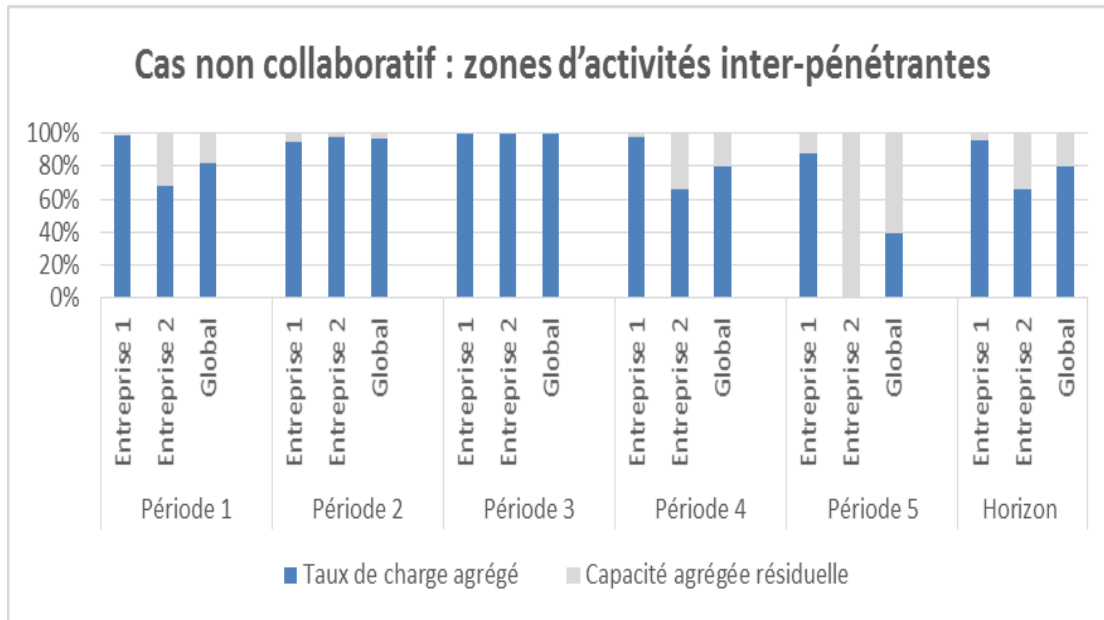


Figure 5.5: Gestion non collaborative : zones d'activités inter-pénétrantes ; plans de charge

5.2.2.3 Gestion non collaborative : situations de carence

Nous introduisons maintenant des scénarios non collaboratifs illustrant des situations de carence en approvisionnement de bois.

Il peut s'agir de *carence locale* (Figure 5.6) pour l'un des acteurs, ici l'entreprise 2, qui peut s'accompagner d'une surabondance de la ressource bois pour l'entreprise 1. Il s'agit dans ce cas d'une situation de déséquilibre d'approvisionnement des entreprises eu égard à la demande globale. Naturellement, ce déséquilibre ne peut être corrigé dans un contexte non collaboratif. Le plan tactique de transport de l'entreprise 1 fournit une solution optimisée répondant à 100% de la demande en produit P1 et P2 de cette entreprise, tandis que l'activité optimisée de l'entreprise 2 ne peut qu'utiliser les stocks disponibles pour couvrir, à hauteur de 57% seulement, la demande en produit P1.

L'activité cumulée des deux entreprises engendre un déplacement de bois de 102 879 t.km pour un taux de satisfaction de 78% de la demande globale.

Enfin, nous mettons en scène une situation de carence globale, dans laquelle la demande globale dépasse le total des stocks disponibles des acteurs réunis, ce qui engendre une carence locale chez chacun d'eux. Dans le scénario représenté Figure 5.6, il y a un déficit d'approvisionnement global de 629 t de produit P1, répartis en

37 t pour l'entreprise 1 et de 481 t pour l'entreprise 2. Les demandes clients de chaque acteur ne sont couvertes que partiellement, un complément d'approvisionnement extérieur est nécessaire.

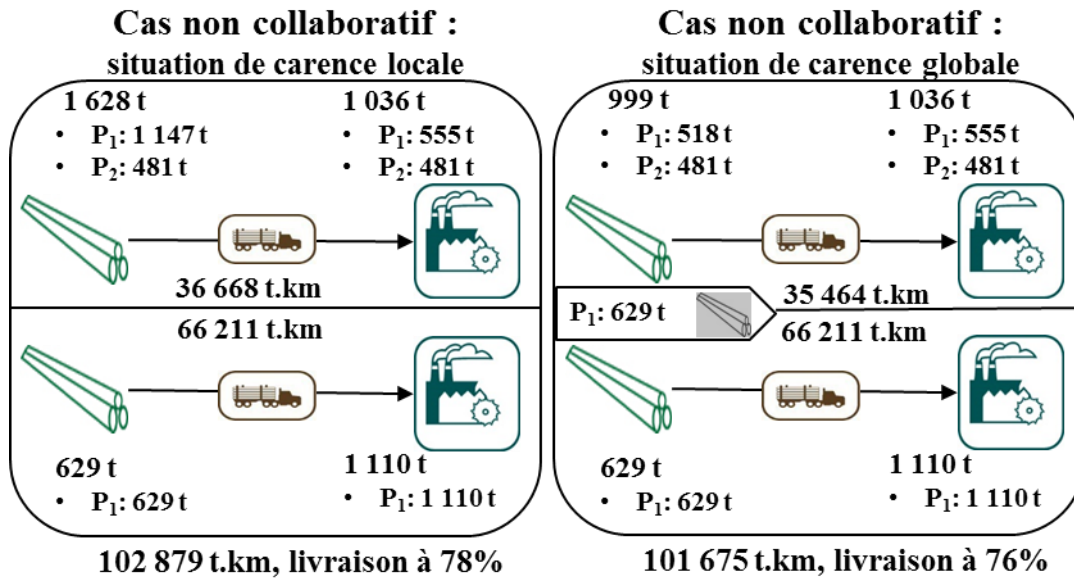


Figure 5.6: Situation de carence locale (à gauche) et situation de carence globale (à droite)

5.2.3 Scénarios collaboratifs

Nous allons maintenant évaluer différents scénarios collaboratifs visant à augmenter les performances logistiques pour la satisfaction d'une demande, dans des conditions de localisation des stocks et des clients, de bois disponible, de commandes et de ressources de transport similaires aux analyses précédentes.

Le périmètre de la planification tactique du transport est ici l'activité globale d'approvisionnement. L'application de notre modèle de décision tactique suppose la centralisation des données dans les mains d'un intégrateur logistique chargé du pilotage coordonné des acteurs de la chaîne. Nous étudions différents degrés de collaboration, correspondant à une mutualisation plus ou moins poussée des marchés, des approvisionnements et des capacités de transport.

5.2.3.1 Mutualisation des stocks

Dans ce scénario collaboratif, les entreprises 1 et 2 ont mis en commun leurs stocks bord de route, tout en gardant leurs clients et leurs ressources de transport propres (Figure 5.7), en annexe 7 le modèle associé sous CPLEX.

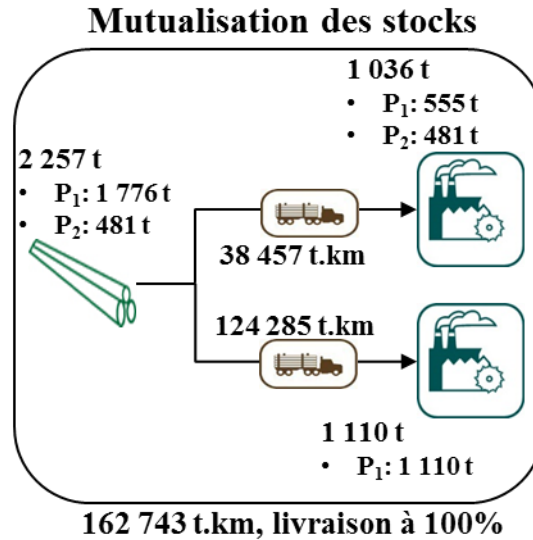


Figure 5.7: Gestion collaborative : mutualisation des stocks, bilan d'activité

Notre modèle tactique a fourni un plan de transport optimisé pour chacune des deux entreprises, conduisant à satisfaire 100% de la demande avec un déplacement global de bois de 162 743 t.km. Ce bilan, optimal au périmètre de l'organisation logistique, est naturellement meilleur que ce celui obtenu par les scénarios non collaboratifs (Figures 5.2 et 5.4). En effet, l'augmentation du périmètre du problème de transport a permis une meilleure affectation des sources de bois aux clients.

Plus précisément, si l'on considère le passage du scénario non collaboratif avec zones d'activité interpénétrantes (Figure 5.4) au scénario collaboratif présent (Figure 5.7), il apparaît une forte réduction d'activité bénéficiant à l'entreprise 1, alors que l'entreprise 2 voit son activité augmenter. L'amélioration du rendement global d'approvisionnement doit donc s'accompagner d'un mécanisme de redistribution des profits entre les partenaires (Audy et al, 2012).

Les plans de charge calculés (Figure 5.8) révèlent un makespan de 5 périodes et un taux de charge agrégée global de 70%, avec néanmoins un fort déséquilibre des capacités de transport entre les deux entreprises, la première s'avérant fortement sous-chargée, alors que les capacités de transport de la seconde sont saturées durant les quatre premières périodes.

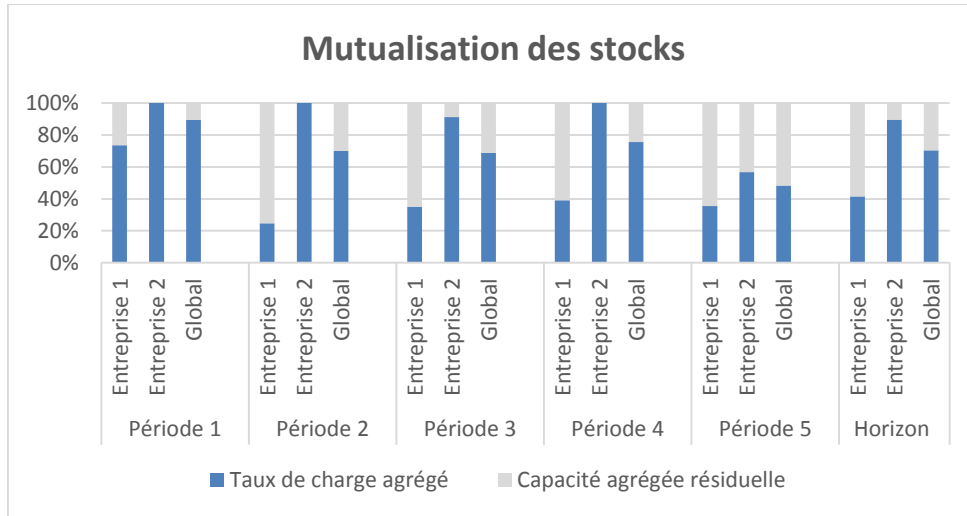


Figure 5.8: Gestion collaborative : mutualisation des stocks ; plans de charge

5.2.3.2 Mutualisation des demandes

Nous observons ici une problématique d'optimisation collaborative du transport caractérisée par une mutualisation des demandes-clients, laissant chaque entreprise conserver une gestion privative de ses approvisionnements et de ses ressources de transport (Figure 5.9).

Dans ce cas, le modèle de planification tactique a calculé un plan de transport pour chacune des deux entreprises, conduisant à satisfaire la totalité des demandes avec un déplacement global de bois sensiblement équivalent au scénario collaboratif précédent (Figure 5.7). Par ailleurs, on remarque une répartition de l'activité des entreprises (Figure 5.10) assez différente du cas précédent.

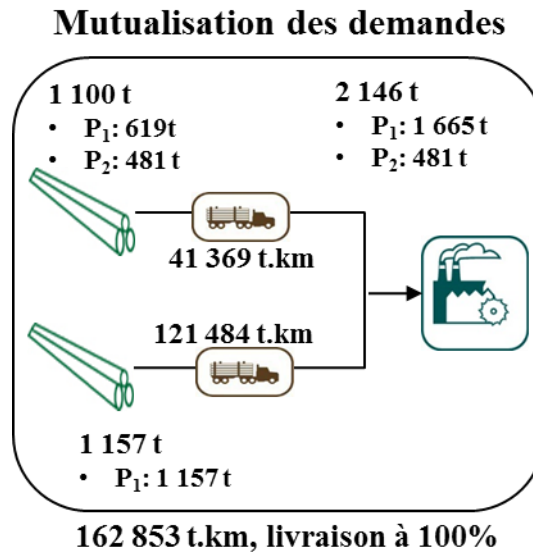


Figure 5.9: Gestion collaborative : mutualisation des demandes ; bilan d'activité

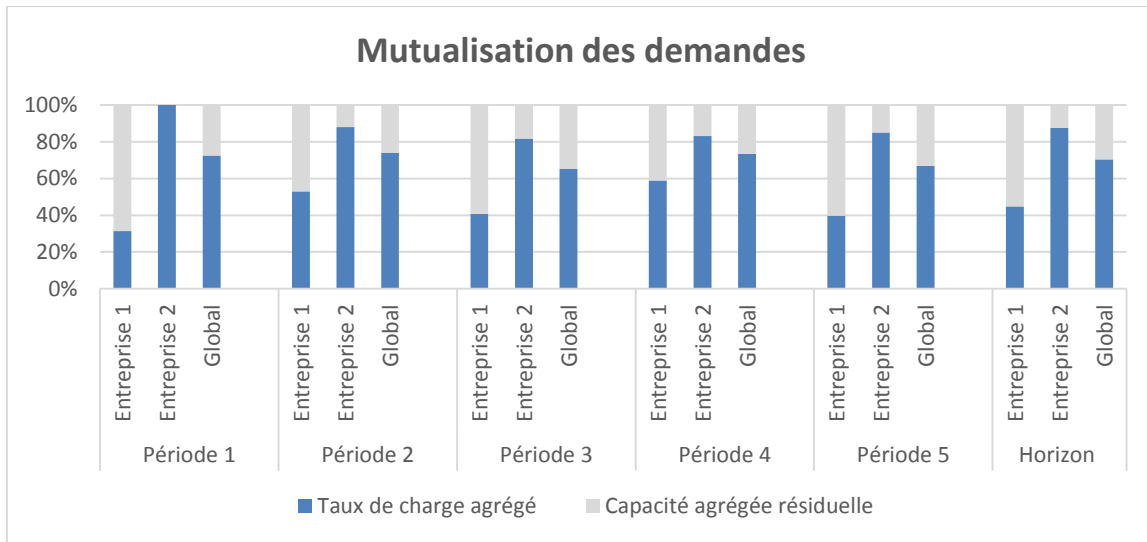


Figure 5.10: Gestion collaborative : mutualisation des demandes ; plans de charge

5.2.3.3 Mutualisation globale

Enfin, poussant le degré de collaboration par une mutualisation conjointe des stocks, des demandes et des ressources de transport, le système logistique considéré (Figure 5.11) relâche les contraintes d'adressage privatif des stocks et des clients par chacune des entreprises. Le déplacement de bois est donc le meilleur possible, équivalent d'ailleurs à ce qui avait été obtenu dans le scénario de mutualisation des stocks (Figure 5.7). Néanmoins, contrairement à ce dernier cas, la gestion en pool de la flotte de 5 camions permet de répartir librement l'activité sur chacune des deux entreprises, en respectant leur capacité de transport respective. Cette répartition peut par exemple, s'il s'agit d'équilibrer les taux de charge des entreprises, s'effectuer au prorata des capacités de transport, à hauteur de 2/5 et 3/5 de l'activité globale, ce qui apparaît sur la Figure 5.11. On peut aussi choisir, d'abord, de saturer la capacité de transport d'une entreprise, puis d'affecter le reliquat d'activité à l'autre entreprise.

**Mutualisation globale:
sources, clients et ressources transport**

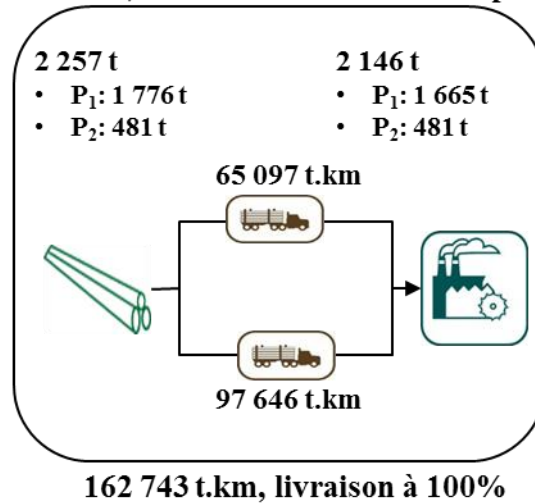


Figure 5.11: Gestion collaborative : mutualisation globale des ressources ; bilan d'activité

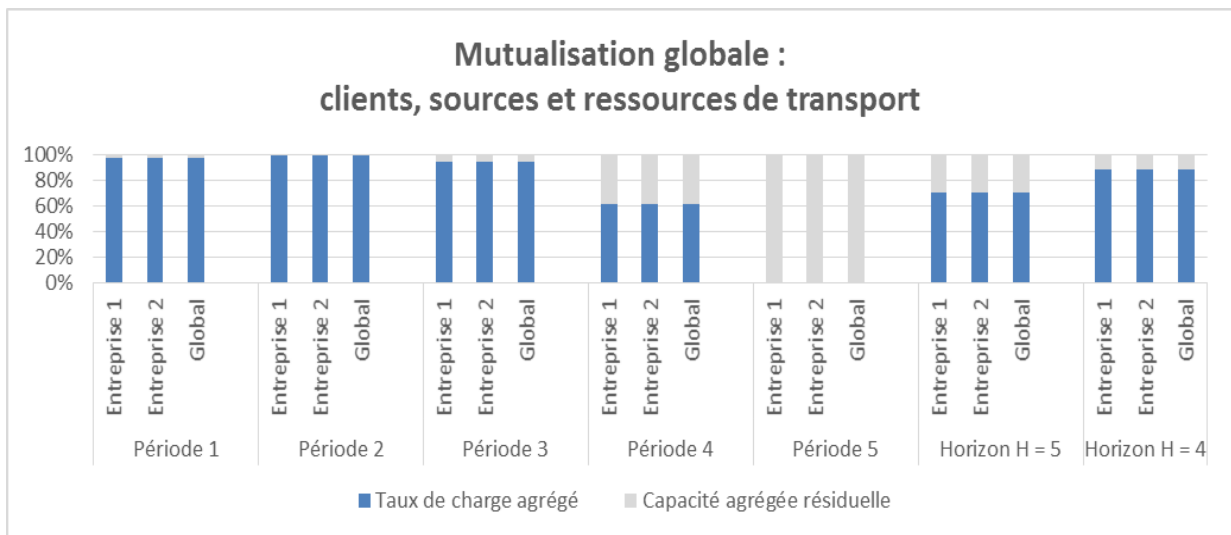


Figure 5.12: Gestion collaborative : mutualisation globale des ressources ; plans de charge

Enfin, considérant le détail du plan de charge optimisé (Figure 5.12), il apparaît un makespan de 4 périodes, meilleur donc que pour le scénario de mutualisation des seuls stocks. Le taux d'exploitation de la capacité globale de transport (ramenée sur 4 périodes) atteint 90%. L'activité résultante pour chacune des deux entreprises est ici représentée pour une distribution 2/5-3/5, ce qui amène à un taux de charge identique de 90% pour chacune d'elle.

5.3 Conclusion

Nous avons appliqué notre modèle de planification tactique avec minimisation du makespan sur un jeu de scénarios de démonstration simples, qui investiguent différents modes de privatisation/mutualisation des données de stock, des commandes clients et des ressources de transport. Les résultats, bien que tributaires du jeu de données, mettent en évidence l'intérêt des scénarios collaboratifs sur la performance logistique d'approvisionnement du bois, vue par le bilan de déplacement du bois. Or, comme cela a été observé dans les analyses rapportées au chapitre 4, un bon plan tactique permet d'initialiser favorablement la réalisation opérationnelle du transport.

Nous résumons ci-dessous les arguments principaux qui militent en faveur d'une gestion collaborative des chaînes d'approvisionnement du bois-forêt :

- *Homogénéiser les bassins d'activité* : réduire le déplacement inutile du bois induit par une mauvaise configuration géographique des bassins d'activité des différents transporteurs, généralement hérités de l'histoire de développement des entreprises, mais pouvant conduire à un maillage incohérent du territoire. Cet argument est particulièrement mis en avant dans le cas de zones d'activité inter pénétrantes,
- *Pallier les situations de carence locale et globale* : lever les situations de carence locale d'acteurs, qui ne peuvent honorer la totalité de leurs commandes, alors même que d'autres acteurs peuvent au même moment se trouver en situation de surabondance de stock vis-à-vis de leur carnet de commande. En cas de carence globale, permettre un réapprovisionnement des stocks offrant une cohérence globale.
- *Dissocier la gestion des flux logistiques des flux commerciaux* : permettre une augmentation de la performance logistique par mutualisation des données (stocks, demande, flottes de transport), sans remise en cause de l'autonomie des partenaires, si besoin par des mécanismes de refacturation entre partenaires.

Nos expérimentations ont confirmé que le niveau d'activité (en termes de déplacement de bois) est d'autant plus faible que le degré de mutualisation des données est élevé. Néanmoins, le choix du degré de mutualisation relève de décisions stratégiques qui sont du ressort de chaque entreprise. Enfin, la centralisation des données nécessaires à une optimisation logistique globale suppose l'existence d'un système d'information étendu à l'activité globale du partenariat.

Conclusion générale et perspectives

Pour conclure, nous résumons nos résultats, identifions leurs limites et dressons les perspectives scientifiques et d'application.

Nos recherches participent de la modélisation, la planification et l'optimisation du transport pour l'approvisionnement en bois de forêt des industries de première transformation. Ici, comme dans d'autres secteurs, la performance recherchée par les acteurs est multiforme : stratégique, financière et économique, logistique. En effet, la stratégie d'entreprise oriente celle-ci vers la recherche de marchés porteurs et l'établissement d'un éco-système éventuellement collaboratif. La dimension financière et économique de la performance est portée par les investissements, des modèles de coûts et des modalités de facturation propres à la filière. Enfin, la performance proprement logistique vise à exploiter au mieux les ressources de transport dans la mise en œuvre de l'activité.

Les modèles décisionnels que nous avons développés visent spécifiquement la dimension purement logistique de la performance, à l'exclusion des dimensions stratégique et économique. Néanmoins, nos propositions ont pris en compte la variabilité des contextes organisationnels, plus ou moins collaboratifs (exploitants forestiers, transporteurs, clients), en séquençant la planification d'activité en deux phases :

- une planification tactique, à caractère générique, qui doit être mise en œuvre par un *superviseur logistique* mandaté pour optimiser une assiette globale d'activité. Sans préjuger de l'organisation mono ou multi-acteurs environnante, on minimise l'activité requise par un plan de charge, sur la base des marchés, des stocks et des ressources de transport accessibles en interne et/ou en externe. L'indicateur d'activité utilisé à ce niveau est le déplacement global de bois en t.km. Cette planification amont s'effectue sous contrainte de capacité -volontairement agrégée- de transport, de sorte à produire un plan de charge réaliste sur le moyen terme et permettant les arbitrages de distribution d'activité vers les acteurs en présence.
- une planification opérationnelle, mise en œuvre par chaque transporteur, prenant en compte les capacités physiques de transport, dans le but d'ordonnancer les tournées des différents camions en minimisant le kilométrage global de la flotte.

Au bilan, nous proposons donc dans ce travail un modèle analytique d'optimisation logistique multiniveaux, qui promeut un raisonnement de rationalisation globale des activités au niveau tactique sous contrainte de capacité de transport virtualisée. Puis, l'édition des plans opérationnels de chaque acteur s'effectue selon le partenariat en présence.

Nous avons éprouvé nos modèles décisionnels en les confrontant à un cas réel de type mono-acteur, en réduisant sa complexité à 2 produits, 5 camions, 15 stocks, 11 clients, 5 jours d'activité. Sur cette base, nous avons obtenu :

- une augmentation substantielle de la performance logistique, tant tactique qu'opérationnelle. Nous attribuons, pour l'essentiel, cette amélioration à la phase d'optimisation tactique qui minimise le déplacement du bois –et donc le travail à effectuer-, avant même de considérer les modalités opérationnelles de transport.
- un temps de calcul très court pour la résolution du problème d'optimisation tactique sur 5 jours, s'opposant à un temps de calcul très important (de l'ordre d'une heure) pour la résolution du problème d'optimisation opérationnelle de la flotte de 5 camions pour une seule journée. En effet, le nombre de variables de décision, notamment les variables binaires de routage, et de contraintes pour la détermination des tournées optimales est rapidement explosif lorsque la dimension du problème d'optimisation opérationnelle croît.

De cette première étude, nous retenons que l'optimisation de niveau tactique est à la fois rapide et à fort enjeu, dans la mesure où celle-ci permet un dimensionnement du plan de charge et un réglage des capacités de transport sur le moyen terme, le tout dans des conditions réalistes (sous réserve d'une pré-évaluation correcte de la capacité agrégée). A contrario, l'optimisation opérationnelle des tournées s'est avérée extrêmement lourde du point de vue calculatoire, et ce pour un gain plutôt imputable à une bonne initialisation du problème par l'optimisation tactique préalable.

Sur la base du même jeu de données, nous avons ensuite évalué une gradation de scénarios collaboratifs simples, en répartissant l'activité sur deux acteurs et en procédant à une mutualisation croissante des données (clients, stocks, capacités de transport). Par ces scénarios, nous avons observé :

- une corrélation entre le niveau de performance logistique (minimisation du déplacement global de bois sur le moyen terme) et le degré de mutualisation des données.
- l'intérêt du partenariat pour équilibrer l'activité des transporteurs, pallier les situations de carence d'approvisionnement et de carence de capacité d'un transporteur.

En définitive, les modèles de décision multi-niveaux élaborés dans cette thèse prennent en compte les principales contraintes-métier du secteur et proposent des modalités d'utilisation compatibles avec une organisation partenariale.

En raison de la complexité des problèmes traités, notre recherche s'est appuyée sur des hypothèses nécessairement restrictives, dont les principales sont les suivantes :

- la difficulté d'intégrer dans les modèles d'optimisation l'ensemble des contraintes-métier pesant réellement sur les pratiques du secteur, celles-ci n'étant d'ailleurs pas toujours explicitées par les acteurs. Ainsi, les 'fenêtres de livraison' qui définissent les heures d'ouverture des parcs des clients n'étaient pas tracées dans les données industrielles dont nous disposions.
- La prise en compte d'un critère purement kilométrique dans notre modèle d'optimisation opérationnelle, au détriment d'une composante chronométrique de la performance. La prise en compte du facteur chronométrique, en sus du facteur kilométrique, nous amenait en effet à des temps de résolution rédhibitoires.
- L'absence de composante économique dans l'expression de la performance. Il nous a semblé en effet prioritaire de nous focaliser sur la minimisation de l'activité intrinsèque de transport, alors que la performance économique est tributaire de modèles de coûts peu génériques.
- Les perspectives ouvertes par cette thèse nous semblent de deux ordres : i) l'amélioration des modèles décisionnels et de leur calculabilité, ii) l'évaluation d'organisation collaboratives complexes.

Une amélioration de notre modèle de planification tactique nécessite de confronter celui-ci à d'autres cas industriels. Notamment, il nous semble prometteur de procéder à l'évaluation de performance d'organisations largement multi-acteurs selon différents scénarios collaboratifs, pouvant par ailleurs comporter des plateformes logistiques situées en forêt ou près des clients. En effet, l'utilisation du modèle tactique permettra, par des temps de calcul tout à fait raisonnables, d'analyser des cas complexes et d'en tirer des indicateurs de performance macroscopique, globaux et par acteur, de premier intérêt, notamment en phase de configuration d'une *supply chain*.

Les améliorations de notre modèle de planification opérationnelle consistent, pour l'essentiel, à tracer les tournées d'un point de vue temporel, sous contraintes de temps de conduite des chauffeurs et de fenêtres de livraison. Néanmoins, le passage à l'échelle industrielle du modèle opérationnel suppose d'implémenter celui-ci par des heuristiques améliorant drastiquement les temps de calcul.

Mais la principale perspective de notre travail nous semble résider dans la contextualisation de nos modèles décisionnels dans un environnement collaboratif de type *Supply Chain*. Pour ce faire, différentes difficultés doivent être résolues :

- Au plan technique, joindre un modèle économique (objectivisation des coûts, redistribution des profits) au modèle d'activité de niveau tactique et compléter les indicateurs de performance en conséquence,
- Au plan technologique, configurer un Système d'Information et l'instrumentation requis pour centraliser les données devant alimenter les modèles décisionnels : planification et suivi de la demande, des coupes, des stocks, des livraisons, plan de charge et suivi des acteurs.
- Au plan industriel, développer l'appropriation des concepts d'aide à la décision et de logistique partenariale par les acteurs du secteur bois-forêt. *La justification des organisations collaboratives est d'opérer un découplage des modèles logistique, économique et juridique* : le partenariat ne remet pas en cause l'autonomie juridique/capitalistique des acteurs, et l'aspect économique (profit des partenaires) peut être dissocié de l'aspect logistique par des modèles de redistribution. L'optimisation logistique permet, quant à elle, de rationaliser l'activité (en qualité de service et en productivité) et ce d'autant plus massivement qu'elle s'applique à une large assiette d'activité, qui peut être intégrée à la fois verticalement (intégration des processus de coupe, d'approvisionnement et de transport) et horizontalement (pool d'acteurs).

Bibliographie

- Akay, A-E., Yilmaz, M., Tonguc, F.: Impact of Mechanized Harvesting Machines on Forest Ecosystem: Residual Stand Damage. *Journal of Applied Science*, 6(11), pp. 2414–2419, 2006.
- Andersson, G., Flisberg, P., Liden, B., Rönnqvist, M.: RuttOpt – A decision support system for routing of logging trucks. *Canadian Journal of Forest Research*, 38, pp 1784-1796, 2008.
- Arraiolos, A., Bonnemazou, M., Challet, E., Forcet, M., Morillon, V.: Inventaire du parc de camion de transport de bois rond en Aquitaine. Rapport FCBA, janvier 2011b.
- Arraiolos, A., Vuillermoz, M., Bigot, M.: ICT deployment strategy in Aquitaine WSC: The explotic project breakthrough. In 34th Council on Forest Engineering. Quebec City, 2011.
- Audy, J-F., D'Amours, S., Rönnqvist, M.: An empirical study on coalition formation and cost/savings allocation. *Int. J. Production Economics*, 136, pp 13-27, 2012.
- Audy, J-F., D'Amours, S., Rönnqvist, M.: Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review. In CIRRELT, 2012b.
- Audy, J-F., D'Amours, S., Rousseau, L-M., Favreau, J., Marier, P.: Virtual Transportation Manager: a Web-Based System for Transportation Optimization in a Network of Business units. The 3rd Forest Engineering Conference, Octobre 1-4, Mont-Tremblant, Canada, 8 p, 2007.
- Audy, J-F., D'Amours, S.: Impact of benefit sharing among in the implantation of collaborative transportation system – An application in the furniture industry, IFIP International Federation for Information Processing, Pervasive Collaborative Networks, Springer, pp 519-532, 2008.
- Audy, J-F., Lindén, B., Favreau, J.: Issues and solutions for implementing operational decision support system – An application in truck routing and scheduling system. 4th Forest Engineering Conference, White River, Afrique du Sud, 5-7 avril, 2011.
- Azouzi R., LeBel L., D'Amours S.: Restructuring the forest value chain using intermediaries: A methodology with application to community-managed forest. Document de recherché CIRRELT, CIRRELT-2012-02, 2012.
- Barratt, M.: Understanding the meaning of collaboration in the supply chain. *Supply chain Management: An Inetrnational Journal* 9(1), pp 30-42, 2004.
- Ben Ismail, S., Legras, F., Coppin, G.: Synthèse du problème de routage de véhicules. Collection des rapports de recherche de Télécom Bretagne, 2011.
- Berbeglia, G., Cordeau, J-F., Gribkovskaia, I., Laporte, G.: Static pickup and delivery problems: A classification scheme and survey. *TOP*, 15(1), pp 1-31, 2007.
- Bigot, M.: L'entrepreneur forestier mécanisé en France : portrait à partir d'études menées sur la période 2000-2009. In *L'entrepreneur forestier du Québec : véritable propriétaire-dirigeant de PME. Portrait Environnement d'affaires. Gestion d'entreprise*. ISBN 978-2-89685-000-6. pp117–134, 2010.
- Bourcet, J., Bourget, C., Danguy des Desert, D.: Le transport du bois et sa logistique. Rapport n° CGEDD 004895-01 et n° CGAAER 1219 du Ministère de l'agriculture et de la pêche. France, juillet 2008.

- Caceres-Cruz, J., Arias, P., Guimarans, D., Riera, D., Juan, A.: Rich vehicle routing problem: Survey. *ACM Computing Surveys*. 47(2), pp 1–28, 2015.
- Carlsson, C., Rönnqvist, M.: Backhauling in forest transportation – models, methods and practical usage. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, pp 2612-2623, 2007.
- Cherkesly, M., Desaulniers, G., Laporte, G.: A Hybrid Metaheuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows and LIFO Loading. *Actes des Journées d'optimisation JOPT*, Montréal, 5-7 mai 2014.
- Chituc, C-M., Azevedo, A., Toscano, C.: An Analytical Approach for Comparing Collaborative Business Frameworks. A. Azevedo (Ed.), *Innovation in Manufacturing Networks*, Springer, 266, pp 37–144, 2008.
- D'Amours, S., Frayret, J.-M., Gaudreault, J., LeBel, L., Martel, A. : «Chaînes de création de valeur». In *Manuel de foresterie*, 2e ed., Éditions MultiMondes, pp.1307-1323. Québec: Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, 2009.
- D'Amours, S., Frayret, J.-M., Rousseau, A.: De la forêt au client - Pourquoi viser une gestion intégrée du réseau de création de valeur. Rapport publié par Consortium de recherche FOR@AC à l'université Laval, 7 p, 2003.
- D'Amours, S., Rönnqvist, M.: An Educational Game in Collaborative Logistics. *INFORMS Transactions on Education*, 13(2), pp.102–113.2013.
- Duflot, C., Montebourg, A., Le Foll, S.: Plan national action pour l'avenir des industries de transformation de bois. Rapport du Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, France, octobre 2013.
- El Hachemi, N., El Hallaoui, I., Gendreau, M., Rousseau, L-M.: Flow-based integer linear programs to solve the weekly log-truck scheduling problem. *Annals of Operational Research*, 232(1), pp 87-97, 2015.
- Elleuch, M. Lehoux, N. Lebel, L. Lemieux, S.: *Collaboration entre les acteurs pour accroître la profitabilité : Etude de cas dans l'industrie forestière*. In 9th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation, pp 1-11, Bordeaux, 2012.
- Emeyrat, R., Girard, L., Poissonnet, M., Foret, M.: Evaluation des systèmes de pesage embarqués dans les camions de transport de bois ronds. Rapport projet pesage camions, FCBA, 2009.
- Epstein, R., Karlsson, J., Rönnqvist, M., Weintraub, A.: Forest transportation. In: Weintraub, A., Bjorndal, T., Epstein, R. (Eds). *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, International Series in Operational Research and Management Science. Chapter 20. New York: Kluwer Academic Publishers. 99, pp 391-403, 2007.
- Eriksson, J., Rönnqvist, M.: Decision support system/tools: Transportation and route planning: Åkarweb – a web based planning system. *Proceedings of the 2nd Forest Engineering Conference*, Växjö, pp 48-57, Sweden, 2003.
- Fleischmann, B.: Advanced planning. *Supply chain management and advanced planning*. Springer, pp.81–106, 2008.

- Flisberg, F., Rönnqvist, M.: FuelOpt: a decision support system for forest fuel logistics. *Journal of the Operational Research Society*, 63, pp.1600–1612, 2012.
- Flisberg, P., Liden, B., Rönnqvist, M.: A hybrid method based on linear programming and tabu search for routing of logging trucks, *Computers & Operations Research*, 36, pp 1122-1144, 2009.
- Forsberg, M., Frisk, M., Rönnqvist, M.: FlowOpt – a decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry, *International Journal of Forest Engineering*, 16(2), pp 101-114, July 2005.
- François, J.: Planification des chaînes logistiques : Modélisation du système décisionnel et performance. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2007.
- Frisk, M., Göthe-Lundgren, M., Jörnsten, K.: Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research*, 205(2), pp.448–458, 2010.
- Gaudreault, J., Forget, P., Frayret, J-M.: Distributed operation planning in the lumber supply chain: model and coordination. *The International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice* 17(3), 168-189, 2009.
- Gingras, C., Cordeau, J-F., Laporte, G.: Un algorithme de minimisation du transport à vide appliqué à l'industrie forestière. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 45(1), pp.41–47, 2007.
- Gourgand. M., Hoa-Pham, T., Tanguy, A. : Planning d'affectation des marchandises: problème de transport à quatre indices. 9th International Conference on Modeling, Optimization & SIMulation, Bordeaux, 2012.
- Hamacek, J-C., Moriceau, L., Paillusseau, P.: Transport de bois ronds en région d'Aquitaine : Application du décret n°2003-416 du 30 avril 2003. Rapport DRE Aquitaine, mars 2008.
- Hirsch, P.: Minimizing empty truck loads in round timber transport with tabu search strategies. *International Journal of Information Systems and Supply chain Management*. 4(2), pp 15-41, 2011.
- Jordan, D.: Coût de transport du bois rond en Suisse: comparaison entre la Suisse et la France dans le domaine politique et économique. Rapport, Ecole HAFL Zollikofen, 2012.
- Labasse, O.: Chaîne d'approvisionnement de 2012, mutualisation, multi-modalité, massification. Rapport de la plateforme générale « langage commun », ECR, France, 2012.
- Laffitte, J-P.: Le transport de bois ronds. Rapport formation transport routier du Ministère de l'agriculture et de la pêche. Juillet 2013.
- Laurent, A-B., Vallerand S., Bouchard M., Carle M-A., D'Amours S.: Multicriteria tool for decision support for harvesting wood products transportation, based on life cycle assessment. 15th Symposium for Systems Analysis in Forest Resources (SSAFR), Québec, 19-21 août 2013.
- Le Net, E., Bajric, F., Vöter, D.: Identification of existing transport methods and alternative methods or new approaches with data about costs, labour input and energy consumption. AFOCEL (FRANCE) FCBA, 2007.

- Lebel, L., Cormier, D., Desrochers, L., Dubeau, D., Dunnigan, J., Favreau, J., Gingras, J-F., Hamel, M., Meek, P., Michaelsen, J., Sarthou, C., Thiffault, N., Tremblay, P-S. : Opérations forestières et transport des bois. In Manuel de foresterie, 2^e ed. Éditions MultiMondes, pp 1245-1304. Québec: Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, 2009.
- Lebel, L.: La place de l'entrepreneur forestier au sein du réseau de création de valeur des produits du bois. In L'entrepreneur forestier du Québec : véritable propriétaire-dirigeant de PME. Portrait Environnement d'affaires. Gestion d'entreprise, 2010.
- Lee, H-L., Padmanabhan, V., Whang, S.: Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. *Management Science*, 50(12), pp 1875–1886, 2004.
- Lehoux, N. Marier, P. D'Amour, S.: Le réseau de création de valeur de la fibre de bois canadienne, In CIRRELT, 2012.
- Lehoux, N., Audy, J-F., D'Amours, S., Rönnqvist, M.: Issues and Experiences in Logistics Collaboration, Springer, pp. 69-77, 2009.
- Lehoux, N., D'Amours, S., Langevin, A. : Collaboration and decision models for a two-echelon supply chain: a case study in the pulp and paper industry. Rapport interne du CIRRELT, 2007.
- Les équipes FCBA et les professionnels.: Mémento FCBA, Document annuel de la filière bois-forêt en France, 2015.
- Marier, P., Audy, J-F., D'Amours, S.: Collaborative Wood Transportation with the Virtual Transportation Manager. In Proc. Of the International Scientific Conference on Hardwood Processing. Quebec City, pp 191–198, 2007.
- Marier, P., Sarrasin, F.: Simulation du modèle VTM avec des données d'entreprises forestières de la région de la Mauricie. In FORAC, 2013.
- Mason, R., Lalwani, C., Boughton, R.: Combining vertical and horizontal collaboration for transport optimisation. *Supply Chain Management. An International Journal*, 12(3), pp 187–199, 2007.
- McNaughton, A., Rönnqvist, M., Ryan, D.: A Model which Integrates Strategic and Tactical Aspects of Forest Harvesting. *System Modelling and Optimization*, pp 189-208, 1999.
- Meyr, H., Wagner, M., Rohde, J.: Structure of Advanced Planning Systems. In *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software, and Case Studies*, H. Stadler et C. Kilger. Springer, pp 09-115, 2008.
- Moad, K., François, J., Bourrières J-P., Lebel, L., Vuillermoz, M.: A bi-level decision model for timber transport planning » conference ILS, Bordeaux, juin 2016.
- Mohsen, A., Gaudreault, J.: Intégration de la simulation et de l'optimisation pour la planification tactique forêt-usines. Congrès International de Génie Industriel (CIGI), Saint-Sauveur, Canada, 12-14 octobre 2011.
- Morneau-Peirera, M., Gaudreault, J., Nourelfath, M., Ouhimmou, M.: An optimization and simulation framework for integrated tactical planning of wood harvesting operations, wood allocation and lumber production. In CIRRELT, document de recherche CIRRELT, 48 p, 2013.

- Murphy, G.: Reducing Trucks on the Road through Optimal Route Scheduling and Shared Log Transport Services. *Southern Journal of Applied Forestry*, 27(3), pp 98–205, 2003.
- Nagati, H., Rebolledo, C., Jobin, M-H.: Collaboration entre les acteurs de la chaîne logistique : conditions de succès. *Gestion*, 34(1), p 27, 2009.
- Naud, M-P., D'Amours, S., Stuart, P.: Modèles de conception de chaînes logistiques vertes et collaboratives pour l'industrie forestière. Journées de l'optimisation JOPT, Montréal, 7-9 mai 2012.
- Nørstebø, V-S., Johansen, U.: *Optimal transportation of logs and location of quay facilities in coastal regions of Norway*. *Forest Policy and Economics*, 26, pp 71–81, 2013.
- Porter, M.E.: Choix stratégiques et concurrence : techniques d'analyse des secteurs et de la concurrence dans l'industrie. Paris: Economica, 426 pages, 1982.
- Rix, G., Rousseau, L-M., Pesant, G.: A Column Generation Algorithm for Tactical Timber Transportation Planning. *Journal of the Operational Research Society*, 66(2), pp 278-287, 2014.
- Rönnqvist, M., D'Amours, S., Weintraub, A., Jofré, A., Gunn, E., Haight, R-G., Martell, D., Murray, A-T., Romero, C.: Operations Research challenges in forestry: 33 open problems. *Annals OR*, 232(1), pp 11-40, 2015.
- Rönnqvist, M., Sahlin, H., Carlsson, D.: Operative planning and dispatching of forestry transportation. Research paper LiTH-MAT-R-, Linköping University, Sweden, 1998.
- Rönnqvist, M.: Optimization in forestry. *Mathematical Programming*, 97(1-2), pp 267–284, 2003.
- Savard, M.: Planification stratégique d'un réseau logistique : cas d'une entreprise forestière au Québec et de ses activités d'approvisionnement. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 2011.
- Shapiro, J-F.: Modeling the supply chain. Duxbury/Thomson Higher Education: 2^e ed, 608 pages, 2007.
- Stadtler, H.: Supply chain management and advanced planning--basics, overview and challenges. *European Journal of Operational Research*, 163(3), pp 575–588, 2005.
- Uusitalo, J-A.: Framework for CTL method-based wood procurement logistics. *International Journal of Forest Engineering*, 16(2), pp 37–46, 2005.
- Vogt, J-J.: The successful cross-dock based supply chain. *Journal of Business Logistics*, 31(1), pp 99–119, 2010.
- Vuillermoz, M., Bigot, M.: Wood measurement in France. In *French contribution to the European Wood Measurement meeting*, FCBA, 6-8 september 2011.

Annexes

Annexe 1 : Le matériel de transport routier

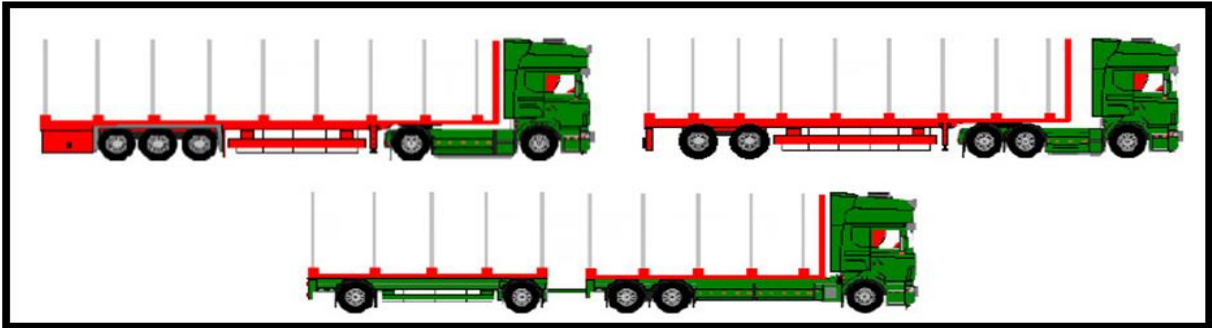


Figure a- 1: Ensemble routiers limités à 48 tonnes, d'après (Lafitte, 2013)

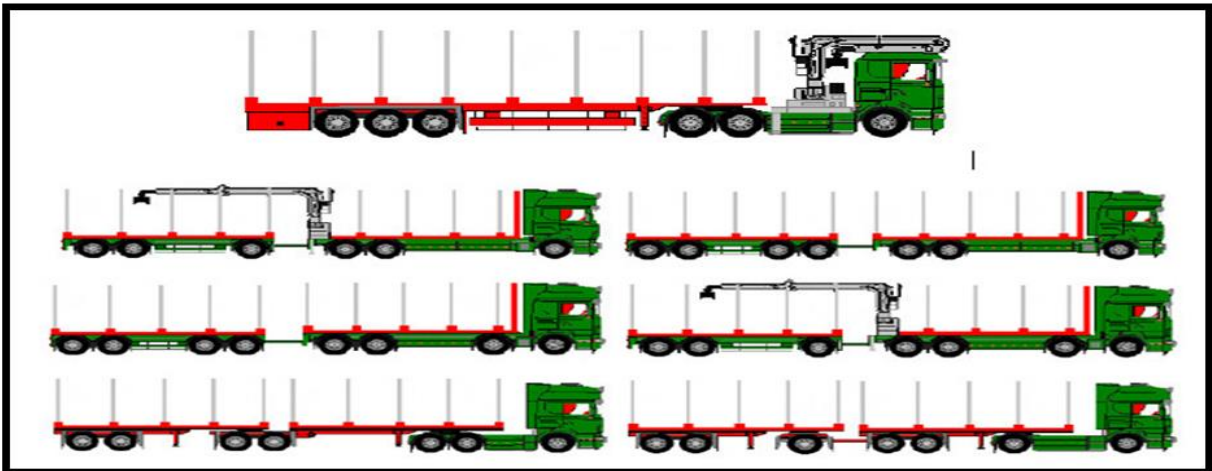


Figure a- 2: Ensemble routiers limités à 57 tonnes, d'après (Lafitte, 2013)

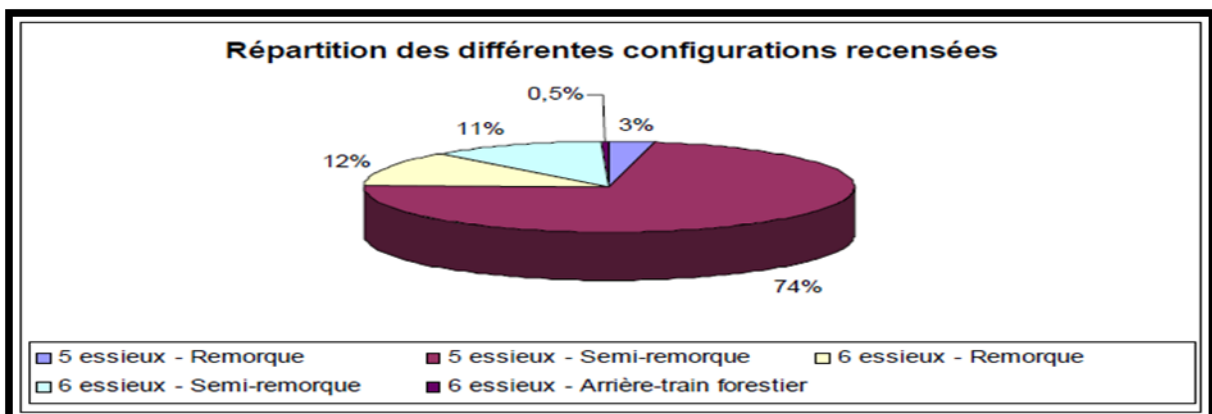


Figure a- 3: Types d'ensembles routiers en Aquitaine, d'après (Arraiolos et al, 2011b)

Annexe 2 : Surcharge et contrôle de poids

Le conducteur d'un ensemble de véhicule affecté au transport de bois ronds doit justifier le poids roulant réel (uniquement pour les véhicules neufs jusqu'au 1er janvier 2015) à l'aide d'un dispositif de pesée embarquée ou de documents tel qu'un bon de pesée de véhicule ou du chargement et doit présenter une attestation sur l'honneur délivrée par l'entreprise réceptionnaire depuis moins d'un an. Le manquement à chacune de ces obligations correspond à une amende forfaitaire minorée de 90 euros en 2013 (Laffitte, 2013).

La verbalisation des surcharges est similaire pour tous les véhicules de plus de 3,5 tonnes. L'infraction au PTAC ou au PTRR est punie par une amende de 4ème classe (amende forfaitaire minorée de 90 euros) pour chaque tranche de dépassement de 1 tonne. L'infraction à la charge à l'essieu ou au groupe d'essieux est punie de la même amende pour chaque tranche de dépassement de 0,3 tonne. Dans tous les cas, un dépassement de poids autorisé de plus de 5% peut donner lieu à l'immobilisation de véhicules jusqu'à la mise en conformité (Laffitte, 2013).

Les décrets relatifs au transport de bois ronds sont présentés ci-dessous :

Extrait du Décret n° 2009-780 du 23 juin 2009 relatif au transport de bois ronds et complétant le code de la route

Art. 3. – [...] La charge maximale applicable à chacun des essieux situés dans un groupe de trois essieux est limitée à 10 tonnes lorsque l'interdistance entre essieux est comprise entre 1,40 m et 1,60 m. [...]

Extrait du Décret n° 2009-780 du 23 juin 2009 relatif au transport de bois ronds et complétant le code de la route

[...] « Art. R. 433-14. – Tout ensemble de véhicules de plus de 44 tonnes de poids total roulant autorisé qui effectue un transport de bois ronds doit disposer d'un équipement ou de documents se trouvant à bord permettant au conducteur de connaître le poids total roulant réel de l'ensemble. Le non-respect de cette disposition est puni de l'amende prévue pour les contraventions de la quatrième classe. [...]

Art. 5. – Le dispositif embarqué de pesage prévu à l'article R. 433-14 du code de la route comporte des capteurs permettant au conducteur de connaître le poids total en charge du véhicule et éventuellement la charge de chaque essieu. Les documents de pesage visés à l'article R. 433-14 du code de la route peuvent être constitués par un document de pesée du véhicule en charge ou un document faisant état du poids du chargement, établi notamment à partir du système de pesage de la grue de chargement.

Annexe 3 : Exemple de résultat d'une optimisation tactique

Tableau a- 1: Planification tactique, exemple de plan de charge multi période (scénario 3)

Plan multi-période												
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	Total général
▣ Période 1	185			37			37	74			74	407
Bois d'industrie	185			37							74	296
Bois d'œuvre							37	74				111
▣ Période 2	185		37	37		37	37	37			37	407
Bois d'industrie	185		37	37		37					37	333
Bois d'œuvre							37	37				74
▣ Période 3	185			74	37			37			74	407
Bois d'industrie	185			74							74	333
Bois d'œuvre					37			37				74
▣ Période 4	111		37	37			37	74	37	37	111	481
Bois d'industrie	111		37	37						37	111	333
Bois d'œuvre							37	74	37			148
▣ Période 5	74	74	37	111		37		74		37		444
Bois d'industrie	74	74	37	111		37				37		370
Bois d'œuvre								74				74
Total général	740	74	111	296	37	74	111	296	37	74	296	2146

Tableau a- 2: Planification tactique, exemple de plan de charge (scénario 3, période 1)

Plan de charge période 1						
	D1	D4	D7	D8	D11	Total général
▣ S1					37	37
Bois d'industrie					37	37
▣ S2	98		37	74		209
Bois d'industrie	98					98
Bois d'œuvre			37	74		111
▣ S3					37	37
Bois d'industrie					37	37
▣ S4	13					13
Bois d'industrie	13					13
▣ S5		37				37
Bois d'industrie		37				37
▣ S6	74					74
Bois d'industrie	74					74
Total général	185	37	37	74	74	407

Annexe 4 : Exemple de résultat d'une optimisation opérationnelle

Tableau a- 3: Planification opérationnelle, exemple de routage des camions (scénario 3, période 1)

Tournées des véhicules								
	k1	k2	K3	K4	K5	K6	K7	Total général
Camion 1	0	37	0	37	0			74
Camion 2	0	37	0	37	0			74
Camion 3	0	37	0	37	0	37	0	111
Camion 4	0	13	24	0				37
Camion 5	0	37	0	37	0	37	0	111



Figure a- 4: Planification opérationnelle, routage d'un camion (scénario 3, période 1, camion 4)

Annexe 5 : Modèle tactique sous CPLEX

```

/* Modèle tactique
*****
// Paramètres
int h=...;
{string} I = ...;
{string} Ir = ...;
{string} Dp = ...;
{string} J1 = ...;
{string} J = J1 union Dp;
{string} S1 = I union Ir;
{string} S = S1 union Dp;
{string} P = ...;
range H = 1..h;
float b[I][P][H]=...;
float s0[S][P]=...;
float d[J][P]=...;
float dist[S][J]=...;
float X[H]=...;
int w[H]= ...;
// Variables
dvar float+ x[S][J][P][H];
dvar float+ s[S][P][H in 0..h];
dvar boolean f[I][P];
dvar boolean T[H];
dvar float+ depIn[S][P][H];
dvar float+ depOut[J][P][H];
// Critère d'optimisation '
minimize 0.7 * sum(i in S,j in J, p in P, k in H) dist[i,j] * x[i,j,p,k]
+ 0.1 * sum(i in I, p in P)f[i,p]
- 0.1 * sum(i in S1, p in P, k in H) depIn[i,p,k]
+ 0.1 * sum(k in H)w[k] * T[k]
/* option lissage
+ 0.1 * sum(k in H)abs(((sum(i in S,j in J, p in P) dist[i,j] * x[i,j,p,k] ) -
(sum(i in S,j in J,p in P, k in H) (dist[i,j] * x[i,j,p,k])/5 )))
*/
;
subject to {
/* Retour au dépôt en charge en fin de journée
*****
Not_Out_Period_1: forall(j in J, p in P)depOut[j,p,1]==0;

Not_In_Period_H: forall(i in S, p in P) depIn[i,p,h]==0;

Not_depot_to_depot: forall(j in Dp, p in P)depOut[j,p,h]==0;

Conservation_de_la_charge: forall(p in P, k in H: k<h)
sum(j in J)depOut[j,p,k+1] == sum(i in S)depIn[i,p,k];

Capacite_depot: forall(k in H)
sum(i in S, p in P)depIn[i,p,k]<= (X[k]/(0.5*37*500)) * 37;

A : forall(j in J, p in P,k in H) depOut[j,p,k]== sum(i in Dp)x[i,j,p,k];

B : forall(i in S, p in P,k in H) depIn[i,p,k]== sum(j in Dp)x[i,j,p,k];

/*Contraintes des stocks, offre et demande
*****
Stock_Initial: forall(i in S, p in P) s[i,p,0] == s0[i,p];

Demande: forall(j in J1, p in P) sum(i in S, k in H)x[i,j,p,k] == d[j,p];

Offre: forall(i in S1,p in P,k in H) sum(j in J) x[i,j,p,k] <= s[i,p,k-1];

Evolution_Sock_Fonds_de_pile: forall(i in Ir, p in P,k in H)
s[i,p,k] == s[i,p,k-1] - sum(j in J) x[i,j,p,k];

```

```
Evolution_Stock_Recent: forall(i in I, p in P, k in H)
    s[i,p,k] == s[i,p,k-1] + b[i,p,k] - sum(j in J) x[i,j,p,k];
/*Contraintes de capacité agrégée par période
*****/
Transport_Capacity: forall(k in H) sum (i in S, j in J, p in P)
    x[i,j,p,k] * dist[i,j] <= X[k];

/*Contraintes des fonds de pile
*****/
Vider1:forall(i in I, p in P) (1/100000) * s[i,p,h] <= f[i,p];
Vider2: forall(i in I,p in P) s[i,p,h] >= f[i,p];

/*Contraintes de makespan
*****/
Makespan1: forall(k in H) (1/10000) * sum(i in S, j in J, p in P)x[i,j,p,k] <= T[k];
Makespan2: forall(k in H) sum(i in S, j in J, p in P)x[i,j,p,k] >= T[k];
}
```


Annexe 6 : Modèle opérationnel sous CPLEX

```

/* Modèle opérationnel
*****/
// Paramètres
{string} I = ...;
{string} J = ...;
{string} Dp = ...;
{string} S = Dp union I union J;
{string} C = ...;
int k = ...;
range K = 1..k;
float W[C] = ...;
float delta [S][S] = ...;
float d[I][J] = ...;
int DepCam[Dp][C] = ...;
// Variables
dvar boolean z[S][S][C][K];
dvar float+ x[S][S][C][K];
dvar float+ w[J union Dp][C][K];
// Critère d'optimisation
minimize 0.7 * sum(i in S, j in S, c in C, kc in K) delta[i][j] * z[i][j][c][kc]
+ 0.3 * sum(c in C) abs(((sum(i in S, j in S, kc in K) delta[i][j] * z[i][j][c][kc]) -
(sum(i in S, j in S, c in C, kc in K) delta[i][j] * z[i][j][c][kc])/5))
;
subject to {
/* Modèle de routage
*****/
Routage1: forall(c in C, i in Dp : DepCam[i][c]== 1)
sum(j in S) z[i][j][c][1] == 1;

Routage2: forall(c in C)
sum (i in S, j in S) z[i][j][c][1] == 1;

Routage3: forall(s in S, c in C, kc in K : kc >= 2)
sum (i in S) z[i][s][c][kc-1] - sum(j in S) z[s][j][c][kc] == 0;

Routage4: forall(c in C, j in Dp : DepCam[j][c]== 1)
sum(i in S) z[i][j][c][k] == 1;

/* Modèle de capacité, offre et demande
*****/
Demande: forall(i in I, j in J)
sum(c in C, kc in K) x[i][j][c][kc] == d[i,j];

Capacite: forall(c in C, kc in K)
sum(j in J union Dp) w [j][c][kc] <= W[C];

/* Modèle de suivi de charge
*****/
SuiviDesCharges1: forall(j in J, c in C, kc in K: kc >= 2)
w[j][c][kc-1] + (sum(i in I : i != j) x[i][j][c][kc]) - w[j][c][kc] >= 0;

SuiviDesCharges2: forall(j in J, c in C, kc in K: kc >= 2)
w[j][c][kc-1] + (sum(i in I : i != j) x[i][j][c][kc]) - w[j][c][kc] <= 10000 *
sum(i in S: i != j) z[i][j][c][kc-1];

SuiviDesCharges3: forall(j in J, c in C, kc in K: kc >= 2)
w[j][c][kc] <= 10000 * (1- sum(i in S: i !=j) z[i][j][c][kc-1]);

Synchronisation: forall(i in S, j in S, c in C, kc in K)
10000 * sum(s in S) z[i][s][c][kc] >= x[i][j][c][kc];

Dechargement: forall(j in J diff Dp, c in C)
w[j][c][k] == 0;
};

```

Annexe 7 : Modèle tactique sous CPLEX (mutualisation des stocks)

```

int h=...;
{string} I = ...;
{string} Ir = ...;
{string} Dp = ...;

{string} J11=...;
{string} J12=...;

{string} J1 = J11 union J12;
{string} J = J1 union Dp;

{string} S1 = I union Ir;
{string} S = S1 union Dp;

{string} P = ...;
range H = 1..h;

float s0[S][P]=...;
float d1[J11][P]=...;
float d2[J12][P]=...;
float dist[S][J]=...;
float X1[H]=...;
float X2[H]=...;
int w[H]= ...;

dvar float+ x1[S][J][P][H];
dvar float+ x2[S][J][P][H];
dvar float+ s[S][P][H in 0..h];
dvar boolean f[I][P];
dvar boolean T[H];

minimize    0.7 * sum(i in S,j in J, p in P, k in H) dist[i,j] * (x1[i,j,p,k]+x2[i,j,p,k])
           + 0.1 * sum(i in I, p in P)f[i,p]
           + 0.2 * sum(k in H) w[k] * T[k]
           ;

subject to {

//Contraintes des stocks
Stock_Initial: forall(i in S, p in P)
                s[i,p,0] == s0[i,p];

DemandeE1: forall(j in J11, p in P)
            sum(i in S1, k in H)x1[i,j,p,k] == d1[j,p];

DemandeE2: forall(j in J12, p in P)
            sum(i in S1, k in H)x2[i,j,p,k] == d2[j,p];

Offfre: forall(i in S1,p in P,k in H)
         sum(j in J11) x1[i,j,p,k] + sum(j in J12) x2[i,j,p,k] <= s[i,p,k-1];

Evolution_Sock: forall(i in S1, p in P,k in H)
                s[i,p,k] == s[i,p,k-1] - sum(j in J11) x1[i,j,p,k] - sum(j in J12) x2[i,j,p,k];

//Contraintes de capacité agrégée par période
Transport_capacityE1: forall(k in H)
                    sum (i in S1, j in J11, p in P) x1[i,j,p,k] * dist[i,j] <= X1[k];

Transport_CapacityE2: forall(k in H)
                    sum (i in S1, j in J12, p in P) x2[i,j,p,k] * dist[i,j] <= X2[k];

```

```
//Contraintes des fonds de piles
Vider1:forall(i in I, p in P)
    (1/100000) * s[i,p,h] <= f[i,p];
Vider2: forall(i in I,p in P)
    s[i,p,h] >= f[i,p];

//Contraintes de makespan
MakespanE1_1: forall(k in H)
    (1/10000) * sum(i in S, j in J11, p in P)x1[i,j,p,k] <= T[k];
MakespanE1_2: forall(k in H)
    sum(i in S, j in J11, p in P)x1[i,j,p,k] >= T[k];

MakespanE2_1: forall(k in H)
    (1/10000) * sum(i in S, j in J12, p in P)x2[i,j,p,k] <= T[k];
MakespanE2_2: forall(k in H)
    sum(i in S, j in J12, p in P)x2[i,j,p,k] >= T[k];

}
```