



# **Intégration de l'optimisation et de la simulation pour l'élaboration et l'évaluation de politiques de production et de transport d'une chaîne logistique**

**Mémoire**

**Wassim Jerbi**

**Maîtrise en génie mécanique**  
Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

© Wassim Jerbi, 2014



## Résumé

Ce mémoire décrit un cadre pour l'élaboration et l'évaluation de politiques de pilotage des réseaux de création de valeur de l'industrie des produits forestiers. Il permet de déterminer la combinaison optimale de politiques de niveau tactique (production et distribution) et de politiques au niveau de l'exécution.

Le cadre s'appuie, d'abord, sur le logiciel LogiLab qui permet de modéliser le réseau de l'industrie des produits forestiers et d'effectuer une optimisation mathématique afin de proposer un plan agrégé de production et de distribution. À partir de ce plan, on extrait des politiques de gestion des flux de production et de transport qui guideront au jour le jour les opérations au niveau opérationnel. Ensuite, les décideurs pourront proposer des politiques d'exécution (par exemple: règles à utiliser pour le chargement des camions). La combinaison de ces politiques est évaluée en utilisant un modèle de simulation à événements discrets, en utilisant le logiciel de simulation SIMIO, qui permet d'évaluer dans le détail ce que serait l'impact de la mise en œuvre de ces politiques.



# Table des matières

Résumé.....	III
Table des matières.....	V
Liste des tableaux.....	VII
Liste des figures.....	IX
Remerciements.....	XIII
Introduction.....	1
Chapitre 1: Concepts préliminaires.....	5
1.1. Réseau de création de valeur.....	5
1.2. Outils d'aide à la décision.....	8
1.2.1. Optimisation et simulation dans le réseau de création de valeur.....	10
1.3. Le réseau de création de valeur de l'industrie des produits forestiers.....	11
1.3.1. Planification au niveau stratégique.....	14
1.3.2. Planification au niveau tactique.....	15
1.3.3. Planification au niveau opérationnel.....	17
1.4. Intégration des différents niveaux décisionnels.....	18
1.5. Problématique.....	18
Chapitre 2: Cadre proposé - intégration des niveaux tactique et opérationnel.....	21
2.1. Phase A – optimisation agrégée au niveau tactique.....	23
2.1.1. Étape 1 : Modélisation du réseau de création de valeur.....	23
2.1.2. Étape 2 : Optimisation des flux.....	27
2.1.3. Étape 3 : Visualisation et analyse.....	27
2.1.4. Étape 4 : Extraction automatique des politiques de production-distribution.....	29
2.1.5. Étape 5 : <i>Définir manuellement les politiques d'exécution</i> .....	32
2.2. Phase B – Anticipation du niveau opérationnel / exécution.....	33
2.2.1. Étape 6 : Simulation détaillée (niveau opérationnel/exécution).....	35
2.2.2. Étape 7 : Analyse.....	38
Chapitre 3: Preuve de concept.....	39
3.1. Cas industriel - Coordination dans un réseau régional de production et de distribution de bois d'œuvre.....	40
3.1.1. Description du cas industriel.....	40

3.1.2. Description de la problématique du réseau .....	42
3.2. Application du cadre.....	44
3.2.1. Phase A – optimisation agrégée au niveau tactique.....	44
(a) Étape 1 : Modélisation du réseau de création de valeur.....	44
(b) Étape 2 : Optimisation des flux .....	49
(c) Étape 3 : Visualisation et analyse .....	49
(d) Étape 4 : Extraction automatique des politiques de production-distribution.....	52
(e) Étape 5 : Définir manuellement les politiques d'exécution .....	57
3.2.2. Phase B – Anticipation du niveau opérationnel / exécution .....	58
(a) Étape 6 : Simulation détaillée (niveau opérationnel/exécution) .....	58
(b) Étape 7 : Analyse .....	65
Conclusion.....	69
Bibliographie.....	71
Annexe : Modèle mathématique sous LogiLab.....	75

## Liste des tableaux

Tableau 1. Volume de production des unités de sciages (en Mpmp) .....	45
Tableau 2. Caractéristiques des unités de séchage et de rabotage. ....	45
Tableau 3. Caractéristiques des processus à l'unité de séchage 1.....	46
Tableau 4. Caractéristiques des processus à l'unité de rabotage 1.....	46
Tableau 5. Stocks de départ .....	47
Tableau 6. Prix de vente des produits rabotés à l'unité de rabotage 1. ....	47
Tableau 7. Résultats de la solution LogiLab.....	49
Tableau 8. Les consignes de production à l'unité de séchage 1.....	52
Tableau 9. Les consignes de production à l'unité de séchage 2.....	53
Tableau 10. Les consignes de production de l'unité de séchage 3.....	53
Tableau 11. Les consignes de production à l'unité de rabotage 1.....	54
Tableau 12. Les consignes de production à l'unité de rabotage 2.....	54
Tableau 13. Les consignes de production à l'unité de rabotage 3.....	54
Tableau 14. Les consignes de distribution à la scierie 1.....	55
Tableau 15. Les consignes de distribution à la scierie 2.....	56
Tableau 16. Les consignes de distribution à la scierie 3.....	57
Tableau 17. Temps inter-arrivé par produit, par unité de sciage et par période (en heure)..	60
Tableau 18. Liste des produits selon leurs caractéristiques dans tout le réseau .....	61
Tableau 19. Temps inter-arrivé des sciages (en heure). ....	62





## Liste des figures

Figure 1. Les niveaux décisionnels (stratégique, tactique et opérationnel) et exemples de décisions associés à chacun. ....	6
Figure 2. Matrice de planification de la chaîne logistique.....	7
Figure 3: La chaîne de création de valeur dans l'industrie des produits forestiers. ....	12
Figure 4. Matrice conceptuelle des décisions de planification de la production de bois d'œuvre et des ventes. ....	13
Figure 5: Cadre pour l'identification et l'évaluation des politiques optimales de pilotage de la chaîne logistique .....	22
Figure 6. Modélisation de la chaîne logistique à l'aide LogiLab. ....	24
Figure 7. Paramétrage des processus sous LogiLab. ....	26
Figure 8: Visualisation du plan de production et de distribution à l'aide de LogiLab. ....	28
Figure 9: Les consignes de production dans un nœud de production. ....	30
Figure 10: Les consignes de distribution d'un produit donné de la sortie d'un nœud de production vers les différents nœuds du réseau. ....	31
Figure 11. Modèle de simulation. ....	38
Figure 12. Processus de production de bois d'œuvre. ....	40
Figure 13. Les processus et les localisations des usines. ....	42
Figure 14. Modélisation du cas d'étude à l'aide LogiLab. ....	48
Figure 15. Visualisation du plan de production et de distribution de la période 1 à l'aide de LogiLab.....	50
Figure 16. Visualisation du plan de production et de distribution de la période 2 à l'aide de LogiLab.....	51
Figure 17. Modèle de simulation pour la combinaison 1. ....	63
Figure 18. L'état en temps réel des stocks, de l'utilisation des processus et les quantités transférées entre les différentes scieries.....	64
Figure 19. Comparaison du profit total des combinaisons et de la solution LogiLab. ....	65
Figure 20. Taux d'utilisation des équipements de chaque scierie de la simulation des différentes combinaisons et de la solution LogiLab. ....	66



*A ma chère famille*

*Ma mère Najet*

*Mon père Mohamed*

*Ma sœur Hajer , son mari Nader et ses enfants Rayan et Salma*

*Ma sœur Mariem et mon frère Radhouane*

*A mes chers amis*

*Charaf et Farah*

*A l'âme de mon frère de cœur Khaldoun*



# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement mes directeurs de recherche, les professeurs Jonathan Gaudreault, Mustapha Nourelfath et Sophie D'Amours, pour leur soutien inconditionnel, la disposition entière et l'aide précieuse qu'ils m'ont prodigué tout au long de ma maîtrise. Je les remercie pour leurs conseils et leurs directives qui m'ont été d'une grande utilité pour le bon déroulement de ce projet.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe du Consortium de recherche Forac pour sa collaboration. Je remercie plus particulièrement Mme. Catherine Levesque, M. Sébastien Lemieux et M. Philippe Marier, pour leur aide précieuse.

Je voudrais également adresser mes remerciements à mes amis Yacine, Ayoub, Samir, Melek, Moemen et Sinda pour leur soutien moral et leurs encouragements.

Je remercie aussi tous les membres de ma famille pour leur soutien indéfectible : ma grand-mère Beya, ma mère Najet, mon père Mohamed, ma sœur Hajer, son mari Nader et ses enfants Rayan et Salma. Ils se sont énormément investis pour que je puisse réaliser ce travail ; je leur en serai éternellement reconnaissant.

Je ne pourrais négliger de souligner tout le soutien que m'ont apporté mes amis Chédi, Khalil, Karim et Ghassen, mon cher frère et ami Charaf et Farah.

Un grand merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

Wassim Jerbi : TVEMFPLV <3



## Introduction

L'industrie des produits forestiers a toujours joué un rôle économique majeur au Canada. Elle représentait, en l'an 2012, 1,9 % du PIB[1] classant ainsi le Canada parmi les plus grands exportateurs de produits forestiers du monde. Cependant, au cours des dernières années, l'industrie a souffert de piètres performances financières [1]. La crise forestière qui sévit au Canada depuis maintenant plusieurs années résulte de plusieurs causes. Une grande partie s'explique par l'évolution du marché mondial et la baisse de la demande. Les causes qui expliquent cette diminution de la demande ne sont pas les mêmes pour tous les produits. Dans le domaine de la production du bois d'œuvre, par exemple, on peut citer la récession aux États-Unis qui a fait fondre les mises en chantier, ce qui a entraîné des fermetures d'usines et pertes d'emplois. D'autres facteurs ont participé à l'amplification des problèmes créés par la crise immobilière dont la montée en flèche de la devise canadienne, les difficultés d'accès au crédit et à l'approvisionnement en bois [2]. Ajoutons à ces faits le faible taux du rendement du capital investi et un excès de la capacité de production [3].

L'industrie des produits forestiers doit donc chercher à améliorer son efficacité en utilisant la matière première et ses capacités de production [4]. Cette amélioration doit être atteinte aux différentes étapes de la production; de la récolte des arbres à la production, en passant par la distribution des produits finis. Dans ce contexte, le défi ne réside pas uniquement au sein de l'entreprise, mais également dans tout le *réseau de création de valeur* auquel elle appartient.

Un *réseau de création de valeur* (ou chaîne logistique) est un réseau d'organisations, personnes, activités, informations et ressources impliquées dans les flux physiques des produits allant des fournisseurs aux clients [5]. Il remplit les fonctions d'approvisionnement en matière première, la transformation de ces matériaux en produits semi-finis ou finis, et le transport entre les unités d'affaires et vers les clients.

La gestion des chaînes logistiques (en anglais, *supply chain management*, qu'on note SCM) concerne la coordination des activités manufacturières et logistiques entre les unités d'affaires qui constituent le réseau de création de valeur [6]. Comme souligné par Jianfeng et al, «la gestion du réseau de création de valeur devient un concept important de gestion

pour les entreprises dans ce contexte actuel véhément» [7]. En effet, une meilleure gestion de la chaîne de création de valeur est un élément clé dans la réalisation d'économies de réseaux. Par conséquent, afin d'atteindre l'utilisation la plus efficace des matières premières et des ressources de production de manière à bien répondre à la demande, l'ensemble des processus de transformation et de logistique doit être systématiquement planifié.

Ces décisions de planification peuvent être regroupées en trois différentes catégories/niveaux: *stratégique*, *tactique* et *opérationnel* [8]. Les décisions stratégiques sont des décisions qui portent sur le long terme. Elles concernent la stratégie globale de l'entreprise. Les décisions *tactiques* sont, quant à elle, des décisions à moyen terme, telles que les cibles de production, les niveaux de stocks, etc. Les décisions *opérationnelles* sont, par contre, des décisions à court terme relatives à la gestion courante et qui assurent, au jour le jour, le fonctionnement régulier et efficace de l'organisation.

La planification tactique sert de pont entre la planification stratégique et la planification opérationnelle. Les décisions tactiques deviennent des contraintes au niveau opérationnel. Cependant, on trouve peu d'information dans la littérature concernant la manière par laquelle les plans tactiques devraient guider la prise de décision au niveau opérationnel.

Dans le cadre du présent travail, on cherche à répondre aux questions suivantes. Comment évaluer la validité/l'applicabilité d'un plan tactique dans le monde réel? Comment la planification tactique peut-elle guider l'élaboration de politiques guidant les opérations au jour le jour au niveau opérationnel?

L'objectif de ce travail est de proposer un cadre permettant de répondre à ces questions. Le cadre combine un modèle d'optimisation mathématique (réalisant la planification tactique), une méthode pour en extraire des politiques applicables au niveau opérationnel, et un modèle de simulation permettant d'anticiper la performance induite par ces politiques.

La suite de ce mémoire est organisée comme suit. Dans le premier chapitre, nous présenterons une série de concepts préliminaires. Nous parlerons du réseau de création de valeur, de l'industrie des produits forestiers, du processus décisionnel, de l'optimisation et de la simulation. Ensuite, nous ferons une revue de littérature sur les modèles de



planification dans l'industrie des produits forestiers. Nous verrons que la majorité des travaux dans la littérature scientifique contiennent peu d'informations sur le passage du niveau tactique au niveau opérationnel. Dans le deuxième chapitre, nous proposerons un cadre pour l'élaboration et l'évaluation des politiques, lequel repose sur l'utilisation conjointe de l'optimisation et de la simulation. Le dernier chapitre est, quant à lui, consacré à la description du cas d'un réseau régional de production de bois d'œuvre. Une version simplifiée du cas est utilisée pour montrer l'applicabilité du cadre. Une conclusion sera présentée à la fin du mémoire pour mettre l'accent sur les retombées économiques du présent travail ainsi que les travaux futurs possibles.



# Chapitre 1: Concepts préliminaires

Ce chapitre présente les notions de base reliées aux réseaux de création de valeur. La première partie est axée sur la description d'un réseau de créations de valeurs et les différentes décisions nécessaires à son opération. Une deuxième partie présentera l'exemple de l'industrie des produits forestiers et présentera une revue de littérature décrivant différentes recherches portant sur les différents niveaux décisionnels dans ce secteur. Enfin, on présentera notre problématique qui concerne le passage des décisions du niveau tactique vers le niveau opérationnel (ou plutôt, au niveau de l'exécution).

## 1.1. Réseau de création de valeur

Simchi-Levi et David [5] définissent la gestion de chaîne logistique (supply chain management, ou SCM) comme «un ensemble d'approches utilisées pour intégrer efficacement les fournisseurs, fabricants, entrepôts et magasins, de sorte que la marchandise soit produite et distribuée avec les bonnes quantités, aux bons endroits, et au bon moment, afin de minimiser les coûts de l'ensemble du système, tout en satisfaisant les exigences de niveau de service.»

Les décisions à prendre pour faire opérer efficacement ce réseau sont définies selon deux axes : les *processus à planifier* et les *niveaux décisionnels* (horizon d'application de la décision). Les *processus* comprennent les fonctions d'approvisionnement, de production, de distribution et de ventes, etc. Le *niveau décisionnel* réfère à trois grandes catégories de décisions *stratégiques*, *tactiques* et *opérationnelles* [8], comme indiqué à la Figure 1. La différence majeure entre ces catégories est la durée pour laquelle la décision sera appliquée. La fréquence de remise en question de la décision varie également. Au niveau opérationnel, on prend des décisions détaillées de manière très fréquente (ex. : horaire des livraisons de la semaine). Au niveau tactique, on travaille avec des informations agrégées et on prend les décisions moins souvent, mais pour une plus longue période (ex. : les cibles de production de chaque produit par mois). Au niveau stratégique, les informations sont très agrégées et on prend des décisions qui guideront nos pas pour une très longue période (ex. : décision d'ouvrir une usine).

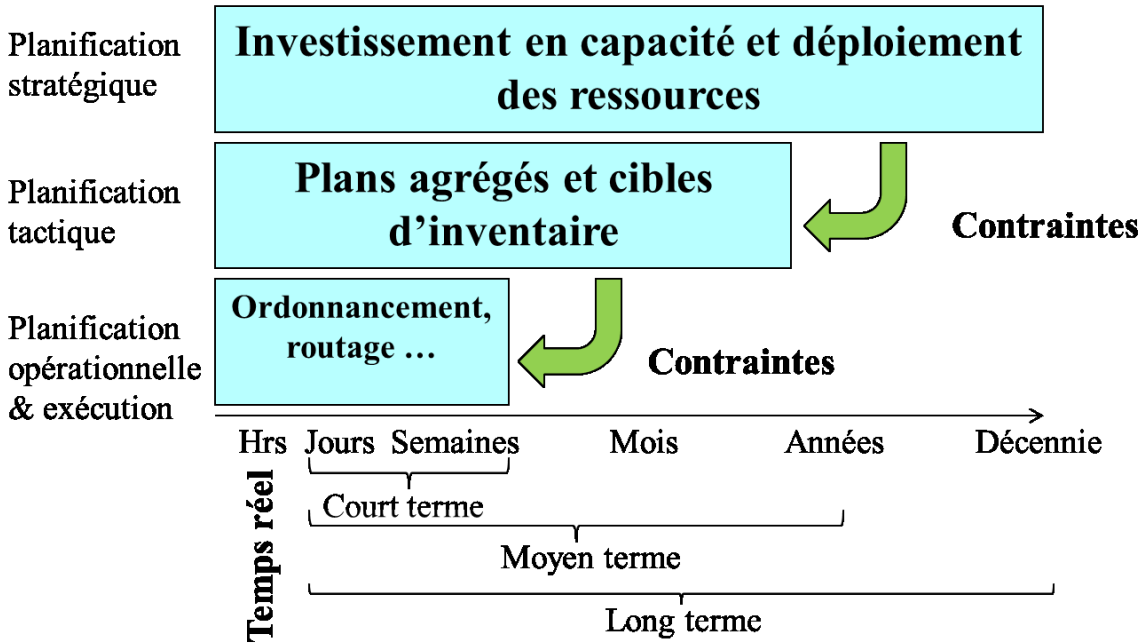


Figure 1. Les niveaux décisionnels (stratégique, tactique et opérationnel) et exemples de décisions associés à chacun.

Meyr et al.[9] ont proposé une matrice qui synthétise les principales activités de planification pour l'entreprise. Dans la Figure 2, l'axe horizontal représente les processus (les activités du processus logistique à planifier) et l'axe vertical représente le niveau décisionnel.

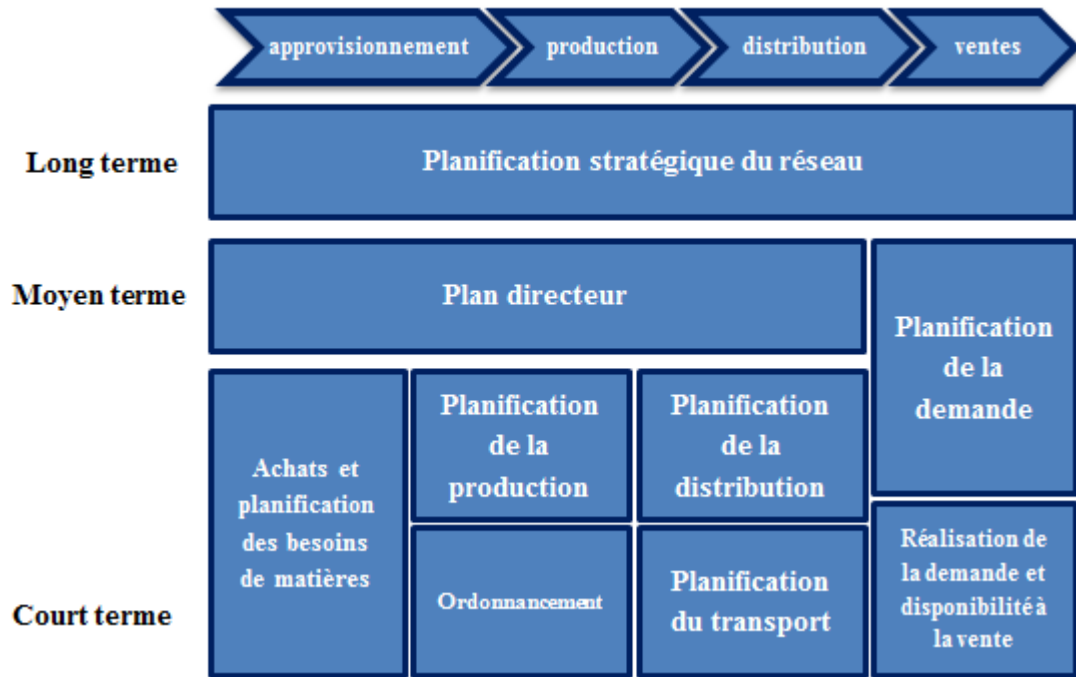


Figure 2. Matrice de planification de la chaîne logistique.  
(Adapté de [9]).

Selon ce cadre, le *niveau stratégique* porte sur les décisions à long terme. À titre d'exemple, il inclut le choix des emplacements pour les installations, le nombre des usines et des entrepôts, les technologies de production à employer et quelle zone client à servir dans chaque installation, l'ouverture ou la fermeture des installations (usine, entrepôt, ligne de production, etc.) et le mode de transport à utiliser. Ces décisions influenceront les décisions d'investissement et détermineront ainsi le réseau par lequel la production, l'assemblage et la distribution serviront le marché.

Les décisions stratégiques servent de contraintes pour le *niveau tactique*. En effet, les décideurs connaissent alors la configuration et la structure de la chaîne logistique. La planification tactique vise à établir comment on peut répondre à la demande des clients tout en maximisant le profit. Ces décisions définiront des règles génériques sous forme de directives pour guider au jour le jour les opérations au niveau opérationnel. Il prescrit des politiques pour la gestion des flux de matériaux (y compris des cibles de production, les niveaux des stocks, tailles de lot, etc.). En règle générale, les décisions tactiques ont un horizon allant de quelques mois à un an. L'activité de planification à ce niveau fournit

généralement un plan de production agrégé [10]. Il est établi en fonction des prévisions, et en utilisant des données agrégées (familles de produits, capacités de transport périodiques), la capacité de production et le temps est agrégé en périodes (par exemple, chaque période du plan pourrait correspondre à une semaine ou un mois). Cependant, il n'est pas clair comment les politiques discutées précédemment peuvent être établies à partir de ce plan de production agrégé, ni comment elles devront être mises en œuvre au niveau opérationnel.

Le *niveau opérationnel* assure la livraison à temps des produits finis aux clients et la coordination des activités logistiques du réseau pour répondre aux demandes des clients. La marge de manœuvre est limitée par l'environnement créé par les décisions prises aux niveaux stratégique et tactique. Il reste à prendre des décisions à court terme qui concernent les opérations au jour le jour. Pour cette raison, ce processus de planification doit refléter adéquatement la réalité détaillée dans laquelle les opérations auront lieu, ce qui assure le fonctionnement quotidien et l'organisation efficace du système. La planification opérationnelle de la production a pour objectif de générer des plans de production détaillés pour les différentes unités d'affaires de la chaîne logistique et l'ordonnancement des différents produits sur les lignes de production. La planification opérationnelle de la distribution vise à réduire la détention des stocks et les coûts de transport tout en développant des plans de transport qui répondent à la demande des clients et respectent la capacité de la flotte de camions disponibles.

## **1.2. Outils d'aide à la décision**

La planification des opérations du réseau de création de valeur (RCV) représente un domaine d'étude intéressant qui a connu un réel essor, comme mentionné par Stadtler dans sa revue de la littérature [11]. La littérature propose un certain nombre de méthodes pour la prise de décision concernant l'opérationnalisation de ces réseaux. Une grande part de ces méthodes exploite soit des *modèles d'optimisation*, soit des *modèles de simulation*.

Premièrement, les modèles d'optimisation sont fondés sur des formulations mathématiques et des procédures d'évaluation des solutions possibles. Leur but est de trouver le scénario optimal pour le problème formulé mathématiquement [8]. Dans notre étude, on s'intéresse aux modèles d'optimisation basés sur la programmation linéaire. Un tel modèle est formé

d'équations linéaires qui décrivent des contraintes s'appliquant aux variables, lesquelles représentent les décisions à prendre. On dispose également d'un objectif (à maximiser ou à minimiser). On trouve les solutions optimales des modèles mathématiques à l'aide d'algorithmes tel que l'algorithme du simplexe [12].

Ses applications sont abondantes et variées, que ce soit dans les sciences de l'ingénieur, en économie mathématique, etc. De fait, l'impact économique de la programmation mathématique est aujourd'hui considérable. Plusieurs entreprises l'utilisent pour résoudre des problèmes liés à l'optimisation de la production et de leur rentabilité, tels que les problèmes de localisation, de gestion de production, de logistique et de transport, de gestion de stocks, d'optimisation de flux dans les réseaux, etc.

Ces modèles d'optimisation ont d'abord été conçus pour déterminer des plans optimaux ou des politiques. À l'opposé, les modèles de simulation ont été développés principalement comme modèles descriptifs, intégrant l'aspect stochastique, pour caractériser l'efficacité opérationnelles des unités d'affaires. Selon Banks [13], la simulation est «l'imitation du fonctionnement réel d'un processus ou d'un système dans le temps. (...) Les modèles de simulation peuvent être utilisés à la fois comme un outil d'analyse pour prédire l'effet des modifications apportées aux systèmes existants, et aussi comme un outil de conception pour prédire la performance de nouveaux systèmes dans différentes séries de circonstances ».

Les modèles de simulation sont utilisés dans plusieurs domaines tels que la production, le transport, la construction, etc. Ils sont des modèles descriptifs qui visent à décrire le comportement d'un système afin de prédire la performance et le comportement futur du système. On peut également prédire les effets qui seront produits par des changements dans la configuration du système. Ils traitent des problèmes complexes et de caractère aléatoire.

Les trois principales méthodes de simulation [14] d'un système sont les suivantes : simulation continue («Continuous Simulation»), simulation à événements discrets («Discrete Event Simulation» : DES) et simulation à taux discret («Discrete Rate Simulation» : DRS) [15].

La simulation à événements discrets [14] est souvent utilisée pour modéliser des systèmes de production. Le fonctionnement d'un système, dans la simulation à événements discrets, est représenté par une séquence chronologique des événements discrets. Les événements se produisent selon un processus stochastique. Chaque événement se produit à un instant dans le temps qui amène un changement d'état dans le système. Les états changent uniquement à ces points discrets dans le temps où l'événement se produit.

### 1.2.1. Optimisation et simulation dans le réseau de création de valeur

Les modèles d'optimisation ont été conçus principalement comme des outils analytiques pour déterminer les plans de production optimaux, mais en pratique ils font souvent abstraction de plusieurs contraintes ou de la nature stochastique de certains paramètres. Harstela mentionne que plusieurs entreprises n'utilisent pas les modèles mathématiques de planification d'approvisionnement car les modèles ont souvent entraîné des solutions trop simplifiées pour les problèmes réels [16]. Il est nécessaire de faire abstraction de la réalité et de faire une copie simplifiée de la réalité sous forme de modèle.

En contrepartie, les modèles de simulation ont été développés principalement comme modèles descriptifs très détaillés permettant de caractériser les opérations générales et la performance d'une unité d'affaires de manière précise. Ils traitent des problèmes complexes et de caractère aléatoire.

Bien que l'optimisation et la simulation soient souvent présentées comme des technologies concurrentes, il est possible d'utiliser les deux approches de manière complémentaire. Par exemple, on peut utiliser la simulation pour évaluer le potentiel d'un plan de production généré par un modèle d'optimisation qui aurait fait abstraction de certains paramètres. Young et Sook [17] ont proposé une approche hybride pour résoudre le problème de planification de production-distribution dans la gestion de la chaîne logistique. Cette approche combine un modèle de programmation mathématique linéaire et un modèle de simulation. Les deux modèles sont développés de façon indépendante et ils sont utilisés ensemble pour résoudre le problème. La procédure de résolution comprend ces trois étapes principales :

- Obtenir les taux de production et de distribution du modèle mathématique.



- Introduire les taux de production et de distribution au modèle de simulation développé indépendamment.
- Simuler le système soumis à des politiques de fonctionnement réelles.

Ces travaux ne mettent cependant pas en évidence comment exécuter les plans dans le fonctionnement réel de la chaîne logistique.

Mendoza et al. [18] ont développé un modèle qui combine optimisation et simulation pour la production de bois d'œuvre. Le modèle d'optimisation génère un plan de production agrégé. Ce dernier est testé à l'aide d'un simulateur en temps réel pour vérifier l'applicabilité opérationnelle. Cependant, ce modèle intégré sert d'outil de développement de plan de production pour une seule scierie.

### **1.3. Le réseau de création de valeur de l'industrie des produits forestiers**

La chaîne logistique de l'industrie des produits forestiers comprend toutes les unités d'affaires intervenant dans l'obtention, la production ou la transformation d'un produit forestier donné et de sa distribution sur le marché.

Elle commence par l'activité de la récolte des arbres, leur transport vers les compagnies de scieries, de pâtes et papier, des produits de bois d'ingénierie et de production d'énergie; comme montre la Figure 3. Le transport est une activité importante dans cette chaîne. Le bois est transporté de la forêt vers les usines de transformation. Les produits finis sont transportés jusqu'aux clients finaux.

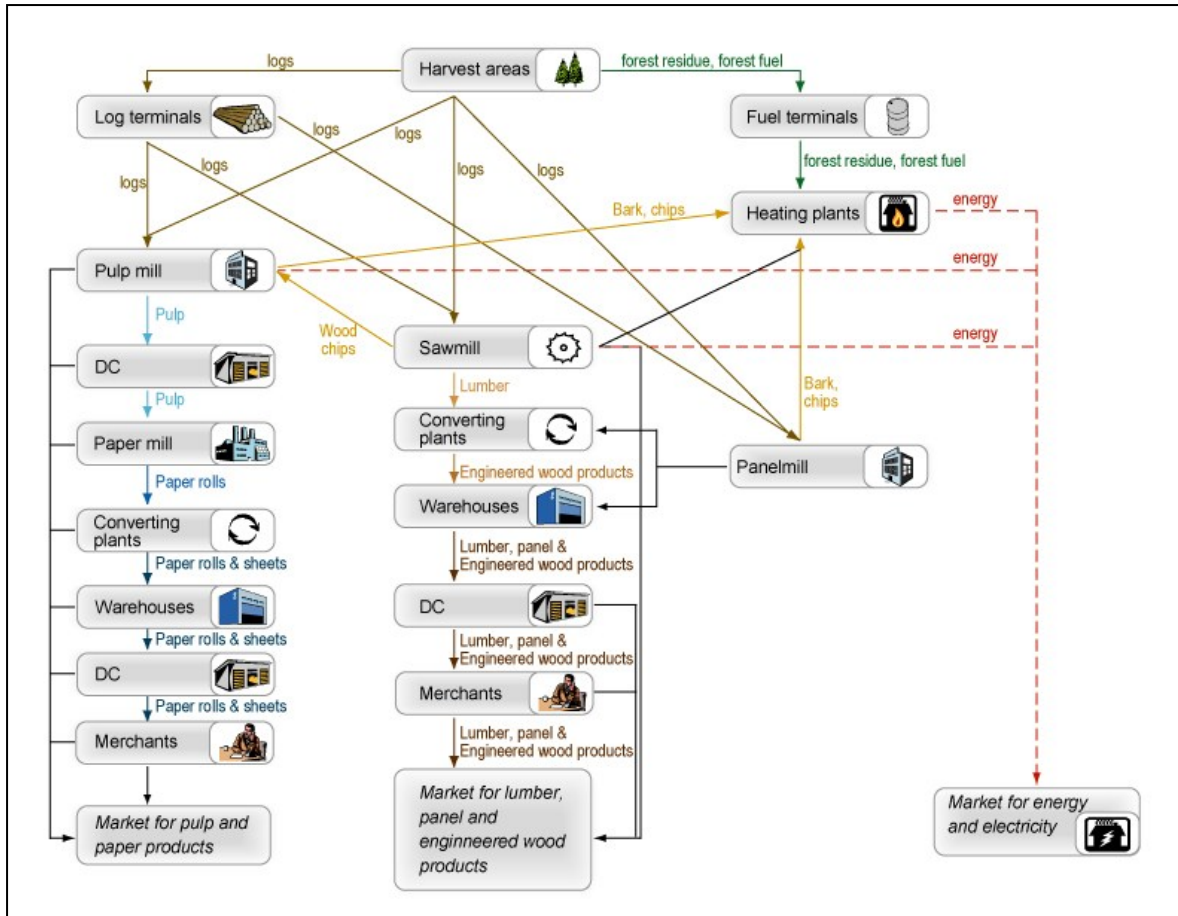


Figure 3: La chaîne de création de valeur dans l'industrie des produits forestiers.  
(D'après [19]).

À ce stade, on doit mentionner qu'il y a deux classes de systèmes de production. Dans un *système de flux tirés*, la production au niveau opérationnel est planifiée en fonction des commandes réelles des clients. Dans un *système de flux poussés*, la production au niveau opérationnel est seulement entraînée par les décisions du niveau tactique (les vendeurs doivent vendre les prévisions de production).

Le processus de fabrication dans l'industrie des produits forestiers est un *processus divergent* : à partir de la même matière première comme produit entrant, plusieurs produits sont générés en même temps comme produits sortants. L'écoulement divergent des flux des produits forestiers [20] implique de nombreuses possibilités de planification des différents processus du RCV. Par conséquent, il est impossible d'avoir un contrôle complet sur les processus de transformation et sa planification peut devenir très complexe.

Voyons d'abord comment peut se faire la planification d'un RCV de l'industrie des produits forestiers. Frayret et al. ont proposé une version adaptée au contexte de l'industrie des produits forestiers (Figure 4) de la matrice de planification décrite initialement par Meyer et al [21] et reproduite à la Figure 2. Elle montre en détail les différentes activités dans chaque niveau décisionnel ainsi que l'interaction entre les différentes parties de la matrice.

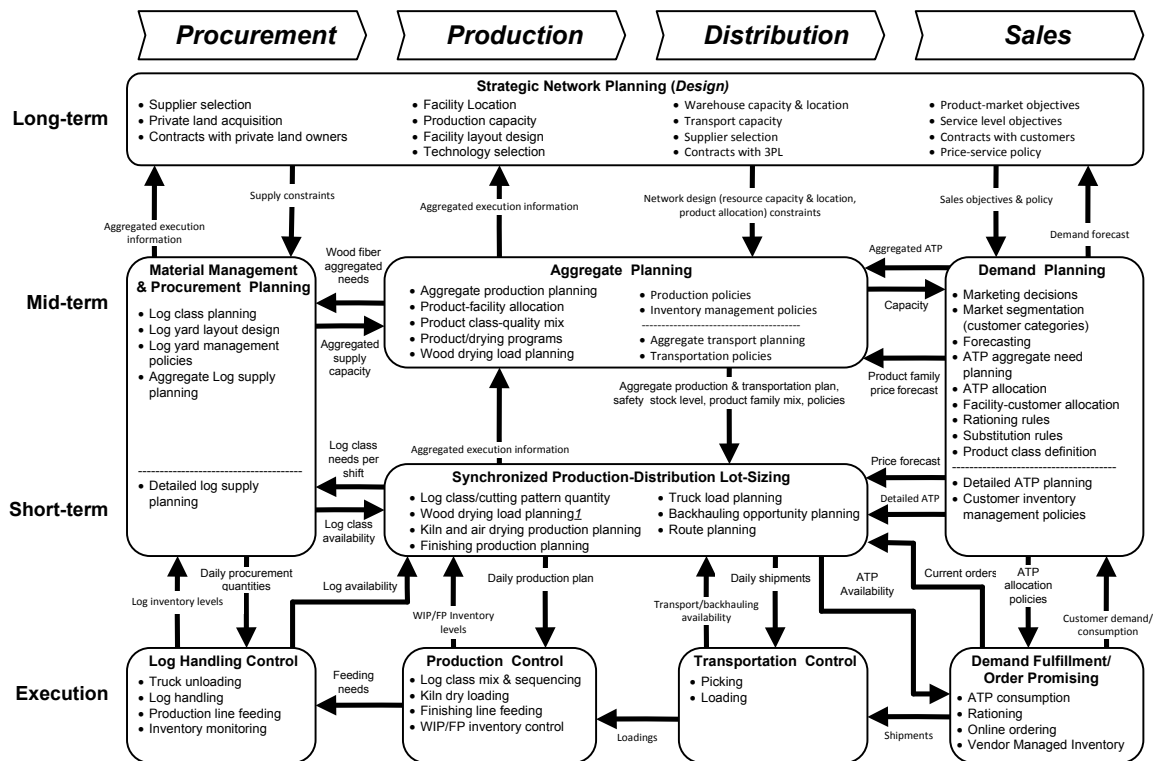


Figure 4. Matrice conceptuelle des décisions de planification de la production de bois d'œuvre et des ventes. (D'après [21]).

Dans ce qui suit, on décrit différents travaux liés à la planification de la chaîne logistique dans l'industrie des produits forestiers. On commence par le niveau stratégique, suivi par le niveau tactique, et enfin le niveau opérationnel/exécution.

### 1.3.1. Planification au niveau stratégique

Vidal et al. [22] ont présenté une revue de littérature détaillée sur la conception de la chaîne logistique et sur les modèles stratégiques de production-distribution. Vila et al. [23] ont développé une méthodologie générique pour concevoir un réseau de production-distribution pour des entreprises industrielles avec des processus divergents dans un contexte multinational. La méthode utilise un modèle de programmation mathématique mixte dans un cadre déterministe. Elle est illustrée dans cet article par son application au cas de l'industrie du bois d'œuvre. Il détermine les unités de production et les centres de distribution à utiliser, la technologie appropriée, la capacité de chaque site, les zones clients que doit couvrir chaque entrepôt, où fabriquer chaque produit, etc. L'objectif est de maximiser le profit global du réseau tout en respectant les contraintes de stockage, de transport, de capacité, la demande client, etc.

Dans la vie réelle, la demande est plutôt stochastique et non déterministe. Vila et al. [24] ont proposé une autre approche axée sur le marché, pour la conception des réseaux de production-distribution pour l'industrie du bois d'œuvre. L'approche est basée sur un modèle de programmation stochastique à deux étapes avec recours. L'approche est développée pour aborder un large éventail de questions, allant de l'adaptation d'une chaîne logistique d'une entreprise à son environnement qui est en constante évolution (évolution des politiques forestières, la rationalisation de l'entreprise par le biais de fusions ou d'acquisitions, etc.). Pour résoudre ce programme stochastique, la méthode SAA (Sample Average Approximation : approximation moyenne de l'échantillon) est utilisée. Cette méthode est basée sur les techniques d'échantillonnage de Monte-Carlo. Ils ont démontré que cette approche est meilleure que l'utilisation d'un modèle déterministe basé sur des valeurs moyennes.

Dans l'industrie des pâtes et papiers, Gunnarsson et al. [25] ont développé un modèle de planification stratégique intégrée du transport des matières premières des zones de récolte aux usines de pâtes, la production et la distribution des produits de pâtes provenant des usines aux clients pour une chaîne logistique d'une grande société européenne de production de pâtes. Ils ont proposé un modèle mathématique mixte pour toute la chaîne logistique dont l'objectif principal est d'optimiser l'affectation des différents produits aux

différentes usines afin de maximiser le profit. La distribution est assurée par trois différents modes de transport: navires, trains et camions. La demande est sous forme de contrats avec les clients avec des prix nets prévus.

### 1.3.2. Planification au niveau tactique

Maness et Adams [26] ont proposé un modèle qui intègre les processus de tronçonnage et de sciage. Le modèle est un programme linéaire mixte en nombres entiers. Il permet de déterminer simultanément les politiques optimales de tronçonnage des tiges et de sciage de bois afin de maximiser le profit pour une distribution donnée de la matière première en entrée et des prix des produits finaux connus. Le modèle comprend une optimisation du motif de coupe qui détermine la configuration de sciage optimale pour chaque bille selon la valeur de bois. Au niveau du tronçonnage, le modèle détermine la combinaison optimale des billes à couper de la tige. Le modèle utilise un processus de détermination de solution sur trois étapes effectuées de manière itérative jusqu'à ce que les bases d'une solution identique soient obtenues. Les auteurs ont montré, pour un échantillon de scierie, qu'une augmentation entre 26%-36% des revenus a été retrouvée, en raison de l'utilisation des politiques suggérées par l'intégration des processus de tronçonnage et de sciage par rapport à celles retrouvées par les modèles qui fonctionnent avec tronçonnage et sciage séparément. Mais, il faut noter que ce système est développé en tenant en compte que d'une seule scierie et d'une seule période de planification. En 2002, Maness et Norton [27] ont développé une extension du modèle pour tenir en compte de plusieurs périodes de planification.

Singer et Donoso [28] ont travaillé sur le cas de la gestion de la chaîne logistique interne dans l'industrie du sciage du Chili. Ils ont montré comment un groupe de scieries peuvent profiter de leurs avantages concurrentiels distinctifs, tels que la capacité de production, le coût variable et la disponibilité des matières premières.

Ils ont proposé un modèle mathématique linéaire pour l'optimisation de la production et des décisions de planification des stocks au sein d'un système avec plusieurs usines. Cependant, l'étude néglige la possibilité d'échanger des produits intermédiaires entre les usines.

Ouhimmou et al.[29] ont étudié le problème de planification tactique pour un réseau de création de valeur d'une entreprise intégrée de meubles en bois au Québec. Les décisions tactiques concernent essentiellement la définition de l'approvisionnement en billots, la sous-traitance et les politiques d'allocation des demandes des clients qui permettront à l'entreprise d'avoir un niveau de service compétitif et ce à coût minimum. Le problème de planification tactique est formulé sous forme d'un programme linéaire mixte en nombres entiers. L'horizon de planification est d'une année et la période de planification est d'une semaine. Dans ce modèle, on suppose que la demande des clients est connue et dynamique. Ce PLM (programme linéaire mixte) est de classe NP-difficile. Une heuristique, basée sur le concept de la décomposition dans le temps, est développée pour résoudre un problème pareil de grande taille dans un temps raisonnable. Ils ont présenté des résultats numériques qui valident l'heuristique.

Farell et Maness [30] ont proposé une approche avec une base de données relationnelle qu'ils ont utilisée pour créer un système d'aide à la décision basé sur un système intégré de programmation linéaire. Elle permet d'analyser à moyen terme les problèmes de planification de production pour une grande variété de fabricants de produits de bois dans l'industrie de deuxième transformation. Le modèle mathématique tient compte des contraintes génériques liées à l'industrie des produits du bois secondaire comme la matière première, le bilan matière, la récupération, la capacité des machines et les considérations commerciales. Ils visent à maximiser les bénéfices de l'opération de fabrication secondaire sur la durée d'une période future. Les auteurs confirment que grâce à sa conception générique, le système décisionnel peut déterminer la gamme de produits, l'approvisionnement en matières premières, les stratégies de production, les stratégies de tarification et d'évaluation des ressources, pour différentes configurations de compagnies dans l'industrie du bois secondaire.

Beaudoin et al [31] ont traité le problème tactique de planification de la capacité de récolte. Ils proposent une approche de planification décentralisée des approvisionnements forestiers basée sur l'usage de modèles mathématiques afin de pallier le problème de coordination des opérations forestières de différentes entreprises qui partagent les mêmes zones de récolte. Ils ont démontré comment un processus de planification tactique est influencé par le résultat du

modèle d'anticipation du niveau opérationnel. Le problème consiste à considérer l'impact opérationnel des décisions de récolte prises au niveau tactique afin de s'assurer de la faisabilité opérationnelle du plan tactique. Un processus de planification tactique basée sur le mécanisme de coordination hiérarchique de Schneeweiss [32] est présenté. L'approche par anticipation proposée est testée et comparée à l'approche actuellement en usage. Ils montrent que cette méthode est valable pour mieux intégrer les décisions opérationnelles importantes dans les plans tactiques.

### 1.3.3. Planification au niveau opérationnel

Gaudreault et al. [33] ont étudié l'utilisation des algorithmes d'optimisation distribués pour résoudre le problème de synchronisation des chaînes logistiques. Ils ont proposé des modèles pour planifier et programmer les opérations de production dans la chaîne logistique de l'industrie de bois d'œuvre constitué de trois unités de planification: unité de sciage, unité de séchage et unité de rabotage, en fonction de la demande. En se basant sur un cas pratique de l'industrie des produits forestiers, ils ont analysé la coordination entre entités autonomes de la chaîne logistique de production du bois d'œuvre dans un contexte hiérarchique. À partir d'une analyse critique des méthodes heuristiques et exactes utilisées dans la pratique industrielle, les auteurs proposent de nouvelles approches multi-agent.

Chandra et Fisher [34] ont fait une étude computationnelle sur l'intérêt de coordonner la planification de la production et la distribution. Ils considèrent une seule usine qui produit un certain nombre de produits sur un horizon multi-périodes et maintient un inventaire de produits finis à l'usine. Les produits sont distribués par une flotte de camion pour un certain nombre de points de vente pour lesquelles la demande de chaque produit est connue pour chaque période de l'horizon de planification. Ils comparent deux approches de gestion de ces opérations. Le premier dans lequel le problème d'ordonnancement de la production et le problème de routage de véhicule sont résolus séparément. Le deuxième dans lequel les deux problèmes sont coordonnés dans le même modèle. Les deux approches sont testées et les résultats montrent que le modèle intégré réduit le coût total de fonctionnement entre 3% et 20%. Mais, cette étude montre l'importance de la coordination de la planification de la production et de la distribution pour une seule usine et non pas pour tous les acteurs de la chaîne de valeur.

## **1.4. Intégration des différents niveaux décisionnels**

Les modèles de décisions tactiques peuvent être utilisés pour anticiper l'impact de décisions stratégiques. En effet, dans le modèle de programmation stochastique à deux étapes avec recours de Vila et al. [24], les décisions de la première étape sont pour la plupart des décisions stratégiques et qui seront les seules décisions mises en œuvre dans la pratique. Toutefois, des variables de décisions supplémentaires doivent être intégrées dans le modèle afin d'anticiper l'impact de la conception du réseau sur le chiffre d'affaires, les coûts d'approvisionnement, des stocks, de la production et de transport.

Beaudoin et al. [31] ont intégré les modèles tactiques avec les modèles opérationnels dans leurs travaux. Ils ont montré comment un processus de planification tactique peut être influencé par le résultat du modèle d'anticipation du niveau opérationnel.

## **1.5. Problématique**

La recherche effectuée dans la littérature nous a permis de bien comprendre la planification d'un réseau de création de valeur de l'industrie des produits forestiers, et les différentes décisions et politiques à prendre pour chaque niveau décisionnel. Nous avons également constaté les avantages reliés à l'intégration des modèles des différents niveaux décisionnels et l'utilisation de façon complémentaire de l'optimisation et la simulation, dans la prise de décisions et la robustesse des résultats.

Toutefois, à notre connaissance, la question de comment mettre en œuvre les décisions et les politiques tactiques au niveau opérationnel pour une chaîne de valeur de l'industrie des produits forestiers est peu étudiée dans la littérature, on trouve par exemple, les travaux de Young et Sook [17], et Mendoza et al. [18]. Les modèles de planification au niveau tactique répondent à des questions telles que:

- Quel est le volume à produire pour chaque produit dans chaque unité de production?
- Quel est le niveau des stocks de chaque produit que contient chaque unité d'affaires?
- Quelle est la proportion pour chaque processus qui nécessite la sous-traitance?



Cependant, ces plans ne traitent pas le problème de comment se fait la production et la distribution journalières afin d'assurer les objectifs établis par les plans tactiques.

Généralement, les décideurs au niveau opérationnel vont maximiser l'utilisation des différentes ressources à savoir matières premières et processus. Les décisions opérationnelles sont prises de façon locale sans tenir compte de leurs effets sur les autres acteurs de la chaîne de valeur, ce qui peut impliquer un mauvais usage des ressources et, des incohérences et sous-optimisation de la chaîne logistique.

Dans le reste de ce mémoire, nous proposons une méthode permettant un meilleur arrimage entre les niveaux tactique et opérationnel. Il sera évalué pour un système en flux poussé de production de bois d'œuvre.



## **Chapitre 2: Cadre proposé - intégration des niveaux tactique et opérationnel**

Ce chapitre présente un cadre pour l'élaboration et l'évaluation des politiques de pilotage d'un réseau de production-distribution. Celui-là fait appel à l'optimisation et à la simulation afin de déterminer et d'exécuter les meilleures politiques qui orienteront les différentes activités journalières du réseau. Cette approche s'applique dans les chaînes de création de valeur où on vise, d'une part, la définition des quantités optimales à produire (pour les différents produits et dans les différentes unités de production), et d'autre part, la définition des flux de produits entre les nœuds du réseau aux différentes périodes.

La Figure 5 résume le cadre proposé. Il comprend sept étapes (étiquetées 1 à 7 sur la Figure 5), allant de la modélisation jusqu'à l'analyse des résultats obtenus. La figure présente également les données produites par chacune de ces étapes. Finalement, les étapes sont regroupées en deux grandes phases (A et B) pilotées par les décideurs.

Dans ce qui suit, nous allons détailler les différentes étapes des deux phases principales du cadre.

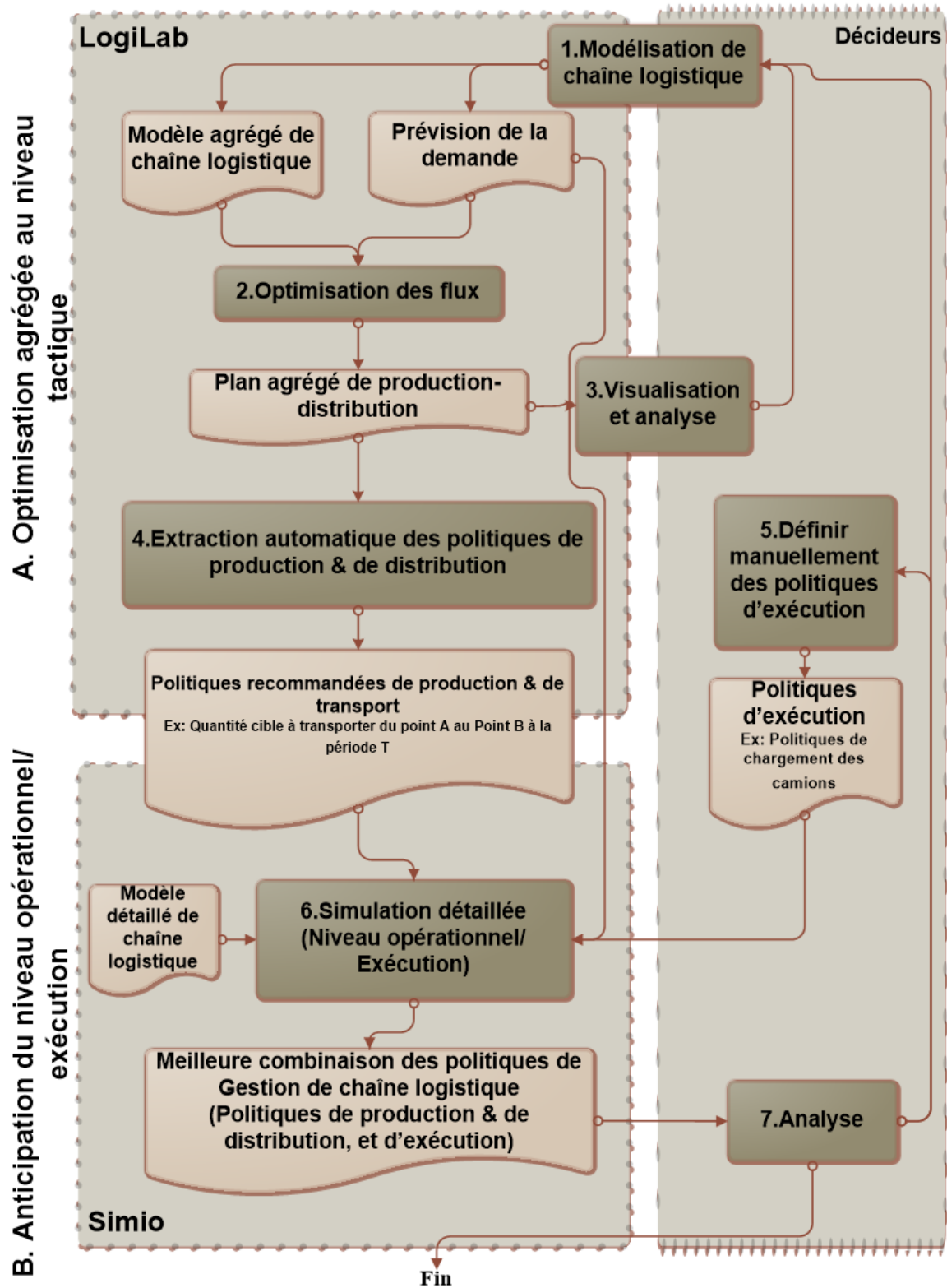


Figure 5: Cadre pour l'identification et l'évaluation des politiques optimales de pilotage de la chaîne logistique

## **2.1. Phase A – optimisation agrégée au niveau tactique**

Cette phase comprend cinq étapes. Elle consiste à déterminer la production agrégée et les flux de produits à utiliser pour exploiter au mieux le réseau. Elle est supportée par un logiciel de modélisation et d'optimisation tactique appelé LogiLab.

Logilab est un outil d'aide à la décision pour le pilotage tactique des réseaux de création de valeur. Il a été développé au Consortium de recherche FORAC. Il s'agit d'un logiciel dont la propriété intellectuelle appartient à l'Université Laval. Une licence commerciale a été accordée à la firme FPInnovations. Il est spécifiquement conçu pour soutenir les décideurs dans la conception et la planification de leur réseau des produits forestiers. Il permet, en utilisant la programmation mathématique, de trouver une solution optimisant la valeur générée. Cet outil permet aux décideurs d'optimiser et d'évaluer des réseaux de création de valeur de l'industrie des produits forestiers avec flux divergents, sans qu'aucune formation en programmation mathématique ne soit nécessaire. La modélisation du réseau logistique se fait graphiquement grâce à une interface simple d'utilisation qui utilise la fonction "cliquer-glisser" (voir Figure 6). On place les différentes unités d'affaires constituant le réseau dans la fenêtre de LogiLab. Ces unités incluent les forêts, les terminaux (sites de stockage du bois, de transbordement ou de tri, les centres de distribution), les processeurs (les scieries, les papeteries et les unités de production d'énergie), les fournisseurs externes et les clients.

### **2.1.1. Étape 1 : Modélisation du réseau de création de valeur**

À l'étape 1 du cadre, l'utilisateur dessine le réseau de la chaîne logistique et modélise les usines en se basant sur des données agrégées. Ceci est réalisé en utilisant une représentation schématique ou géographique du réseau, comme montre la Figure 6. L'utilisateur place les divers éléments de son réseau sur la carte, et définit les intrants et les extrants de chaque unité d'affaires, selon chaque processus de transformation en cause. Il définit également les flux de produits possibles entre les unités d'affaires, ainsi que les distances.

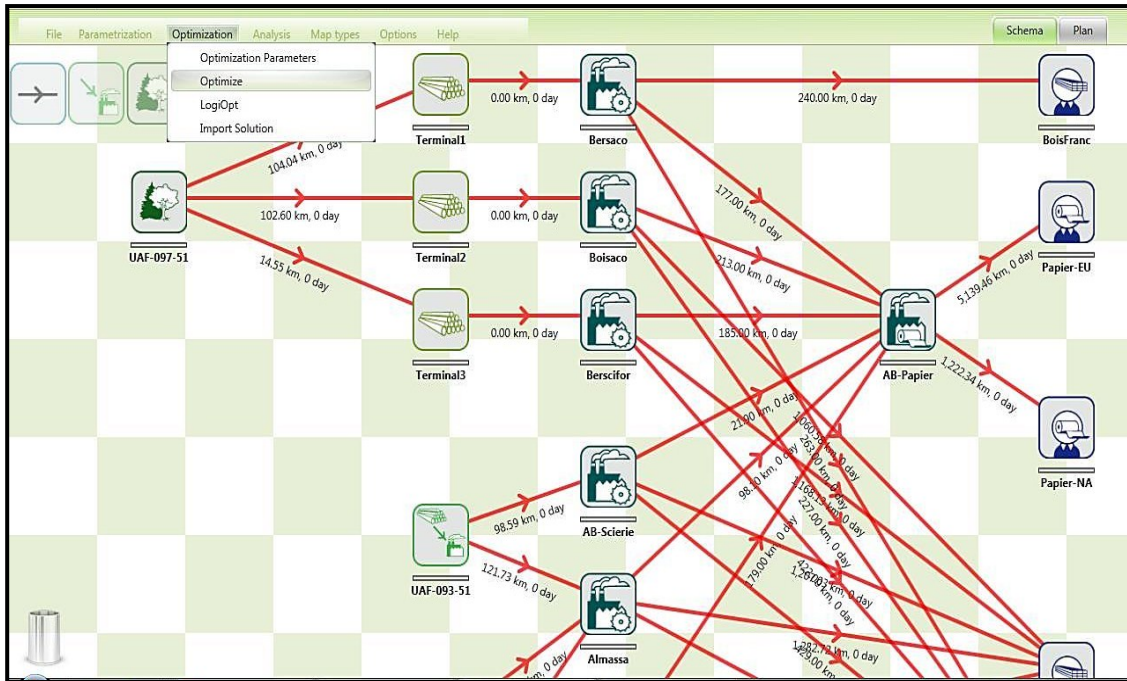


Figure 6. Modélisation de la chaîne logistique à l'aide LogiLab.

Chaque nœud de production peut correspondre à une usine ou à une partie d'usine. Quelle que soit la nature du nœud de production (par. ex. sciage, séchage ou rabotage) la modélisation est semblable. Dans chaque nœud de production, on a des produits entrants, des processus de production alternatifs, des produits sortants (les produits sortants des processus restent en stock en attente de décision de distribution) et des ressources de production. Chaque processus est caractérisé par une combinaison de produits entrants, une durée de transformation et une combinaison de produits sortants. Par exemple, le processus 1 fait la transformation d'une combinaison définie des produits A1 et B1 (par exemple 200 unités de A1 et 100 unités de B1) pendant une durée de transformation (par exemple 1 heure) et on obtient à la sortie des quantités définies, selon les quantités entrantes et le processus, des produits A2, C2 et Z2 (par exemple 200 unités A2, 200 unités C2 et 200 unités Z2).

Les caractéristiques et capacités d'une unité d'affaires peuvent changer d'une période à l'autre. Pour cela, avant de commencer la modélisation sur LogiLab, il faut établir l'horizon de planification en définissant le début de l'horizon, le nombre de périodes et l'horizon total. Généralement, on considère un horizon de cinquante-deux périodes d'une semaine. De

préférence, on considère un horizon de planification d'un an ou plus afin de refléter l'aspect saisonnier de l'approvisionnement, de la production et de la demande.

L'utilisateur doit, alors, collecter les informations nécessaires pour la modélisation du réseau pour chaque période tactique :

- Pour les fournisseurs, on définit pour chaque période:
  - la liste des produits disponibles, la quantité et le prix par unité choisi pour chacun d'eux;
  - les clients;
  - l'emplacement géographique ou le code postal.
- Pour les unités de transformation (ou nœud de production), on définit pour chaque période:
  - la capacité de production totale selon l'unité choisie;
  - la liste des produits entrants et des produits pouvant être produits;
  - la liste de processus dont chacun est caractérisé par (Figure 7):
    - ❖ la capacité de production utilisée;
    - ❖ le coût de production;
    - ❖ la liste des produits intrants et la liste des produits sortants du processus, avec une quantité associée à chacun d'eux.
  - la liste des fournisseurs;
  - la liste des clients;
  - l'emplacement géographique ou le code postal.

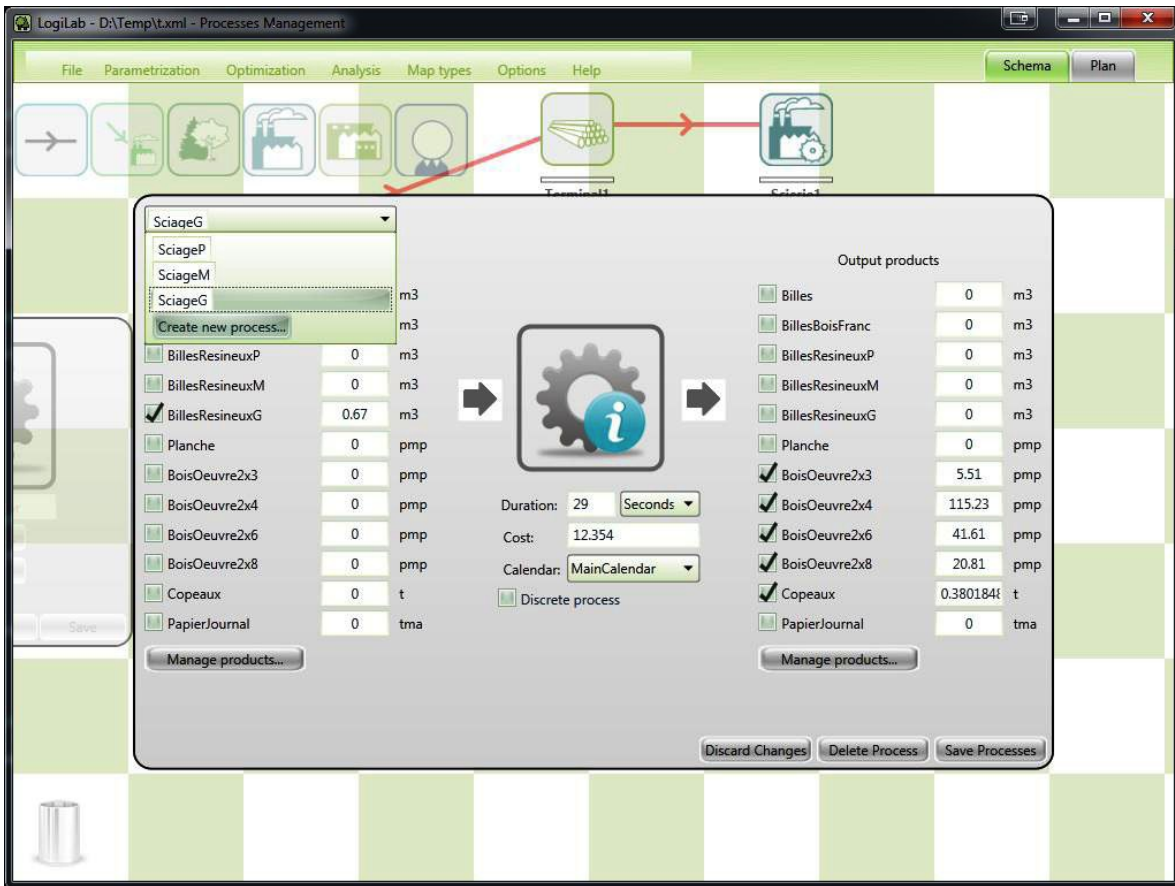


Figure 7. Paramétrage des processus sous LogiLab.

- Pour les clients, on définit pour chaque période:
  - la liste des demandes de produits. Pour chacun d'entre eux, une quantité et un prix par période;
  - la liste de vendeurs;
  - l'emplacement géographique ou le code postal.
- Pour les flux entre les unités d'affaires, on définit les éléments suivants :
  - l'origine et la destination;
  - la distance de transport;
  - le coût de transport selon les produits et par unité de volume;
  - le délai de transport pour chaque origine destination;
  - Capacité globale.



### 2.1.2. Étape 2 : Optimisation des flux

Une fois le réseau modélisé, l'optimisation des flux multi-périodes est réalisée par LogiLab, en fonction des prévisions de la demande et l'horizon de planification défini.

LogiLab intègre un modèle mathématique qui fait la planification tactique de la production et la distribution pour un réseau de création de valeur donné de l'industrie des produits forestiers. Il analyse la demande et l'approvisionnement de façon agrégée et optimise les processus de production et les flux de transport en respectant les contraintes de capacités. Ainsi, la fonction-objectif peut être exprimée de deux façons selon l'objectif des décideurs, soit la maximisation du profit global ou la minimisation de l'ensemble des coûts.

Ce modèle mathématique permet, grâce à sa formulation générique et à son approche processus, de s'ajuster à plusieurs problèmes de réseaux différents. La description détaillée du modèle mathématique utilisé par LogiLab ainsi que les différents paramètres et les notations mathématique sont détaillés à l'Annexe. Le modèle ayant été publié dans [35], ce dernier est du domaine public.

Les résultats de l'optimisation fournissent un plan tactique agrégé (plan de production-distribution agrégée) sur un horizon de plusieurs périodes (généralement 52 semaines). Le logiciel précise pour chaque usine et chaque produit, le volume fabriqué par période et les processus à utiliser. Pour un produit donné, il précise également le volume à transporter d'un nœud du réseau à un autre.

### 2.1.3. Étape 3 : Visualisation et analyse

Le plan tactique peut être visualisé et analysé par les décideurs (étape 3) en utilisant les rapports fournis par Logilab et les interfaces-utilisateur comme montre la Figure 8.

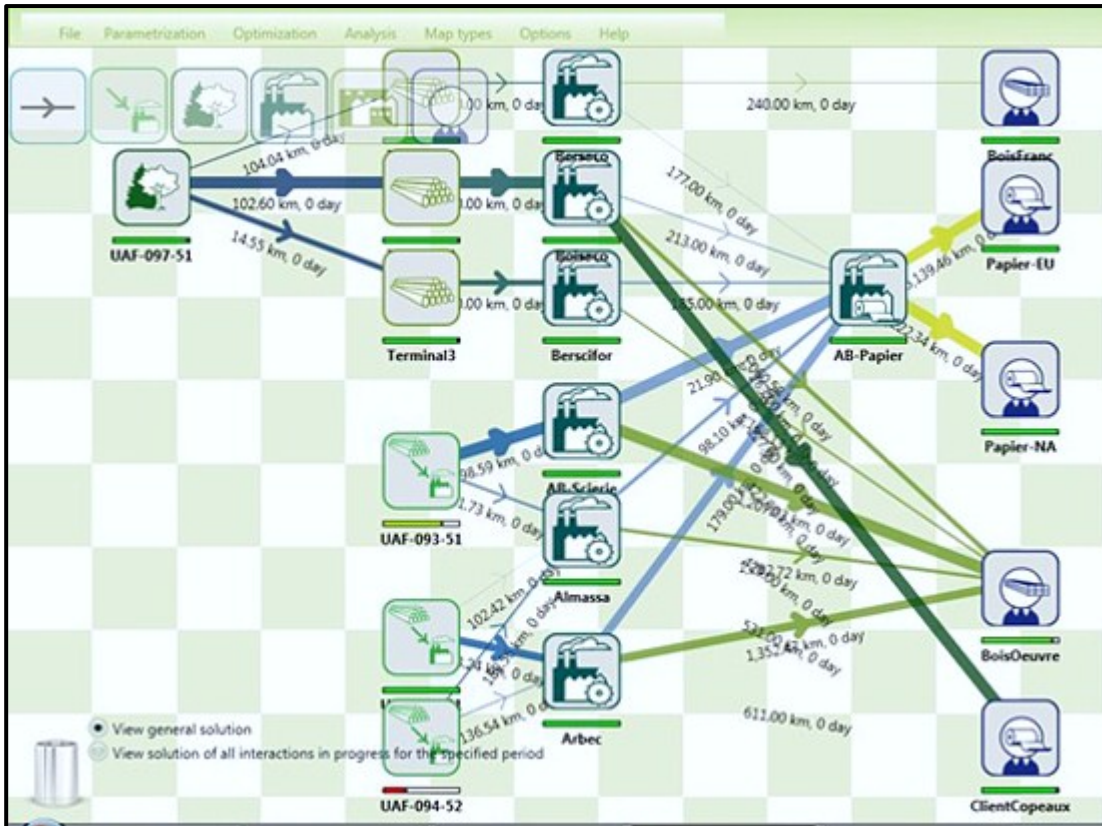


Figure 8: Visualisation du plan de production et de distribution à l'aide de LogiLab.

Dans la Figure 8, on peut voir que les volumes à transporter d'un nœud à l'autre sont affichés sur les arcs (les couleurs et les poids sur les arcs facilitent l'analyse) et la barre en couleur en bas de chaque entité indique la capacité utilisée en pourcentage.

L'ensemble des résultats peuvent être fourni en version imprimable et voici quelques éléments :

- Profit global du réseau;
- Coût total du réseau;
- Coût par unité de transformation et par processus;
- Coût de transport;
- Plan de production pour les unités de transformation, le volume produit et consommé de chaque produit, la capacité utilisée par chaque processus;
- Plan de distribution pour les unités de transformation (la distribution contient les plans de livraison et de réception pour l'ensemble des unités d'affaires, ce qui

représente les flux dans le réseau);

- Différents outils statistiques :
  - Niveau d'inventaire et production par période;
  - Indicateurs de de capacités utilisées (par exemple, usine à pleine capacité, lien routier saturé).

#### 2.1.4. Étape 4 : Extraction automatique des politiques de production-distribution

Les résultats de l'optimisation des flux multi-périodes à l'étape 2 fournissent un plan tactique agrégé de production-distribution sur un horizon de plusieurs semaines (généralement 52 semaines). La question qui se pose est « comment exploiter ce plan de manière à guider le fonctionnement journalier de la production et de la distribution ? ».

Rappelons que les capacités et les périodes de temps sont définies de manière agrégée au niveau tactique. Au niveau opérationnel, ce plan optimal ne peut pas être exécuté tel quel. La première raison est que l'information doit d'abord être désagrégée. Qui plus est, différents aléas liés à la nature aléatoire de la production et de transport empêcheront d'exécuter parfaitement le plan tactique. On ne pourra donc jamais obtenir exactement la performance annoncée par le plan tactique.

On doit donc extraire du plan tactique certaines informations qui deviendront plutôt des consignes identifiant approximativement des cibles à atteindre. On peut citer à titre d'exemple des cibles pouvant être extraites du plan tactique: le temps pendant lequel utiliser chaque processus de fabrication dans chaque nœud et à chaque période (et indirectement les quantités de produits consommées et fabriquées), et les quantités de produit à transférer d'un nœud à l'autre à chaque période. Nous les appelons *politiques de production et de distribution*. Pour détailler notre approche, nous supposerons un réseau de plusieurs scieries. Chaque scierie serait constituée d'un triplet de nœud de production : nœud de production de sciage, de séchage et de rabotage. Le transport des produits entre les différentes scieries se fait par des camions.

LogiLab nous fournit, à chaque période et pour chaque nœud de production, le temps d'utilisation de chaque processus (et indirectement les quantités de produits consommées et fabriquées). Les temps d'utilisation de chaque processus constitueront alors des

cibles/consignes à donner à l'opérateur. Les rectangles rouges dans la Figure 9 illustrent les consignes de production pour les processus à utiliser.

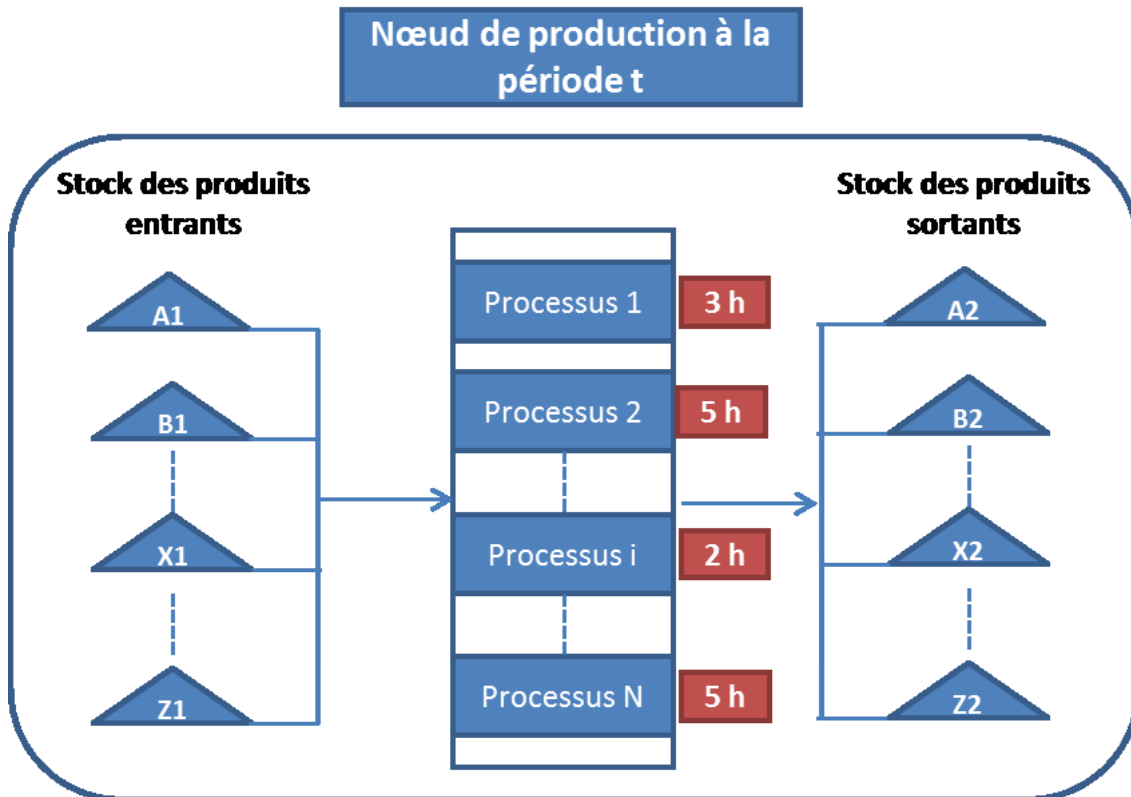


Figure 9: Les consignes de production dans un nœud de production.

LogiLab nous fournit aussi, à chaque période et pour chaque produit associé à la sortie d'un nœud de production, des quantités cibles à transférer vers les différents nœuds du réseau. La quantité disponible d'un produit est la somme du stock à la fin de la période précédente plus la quantité produite par le nœud de production durant la période t. La destination du transfert peut être soit un autre nœud de production interne de la même scierie ou bien nœud externe dans une autre scierie. Les consignes de distribution à donner à l'opérateur sont les quantités à transférer d'un nœud à l'autre pour chaque produit. La Figure 10 présente les consignes de distribution pour le produit A2 à la sortie du nœud de production 2. À partir de la quantité disponible du produit A2, il faut transférer 200 unités vers le nœud

de production 5 de l'unité 2, 300 unités vers le nœud de production 7 de l'unité 3, 200 unités vers le nœud de production 4 interne de l'unité 1 et garder 100 unités en stock.

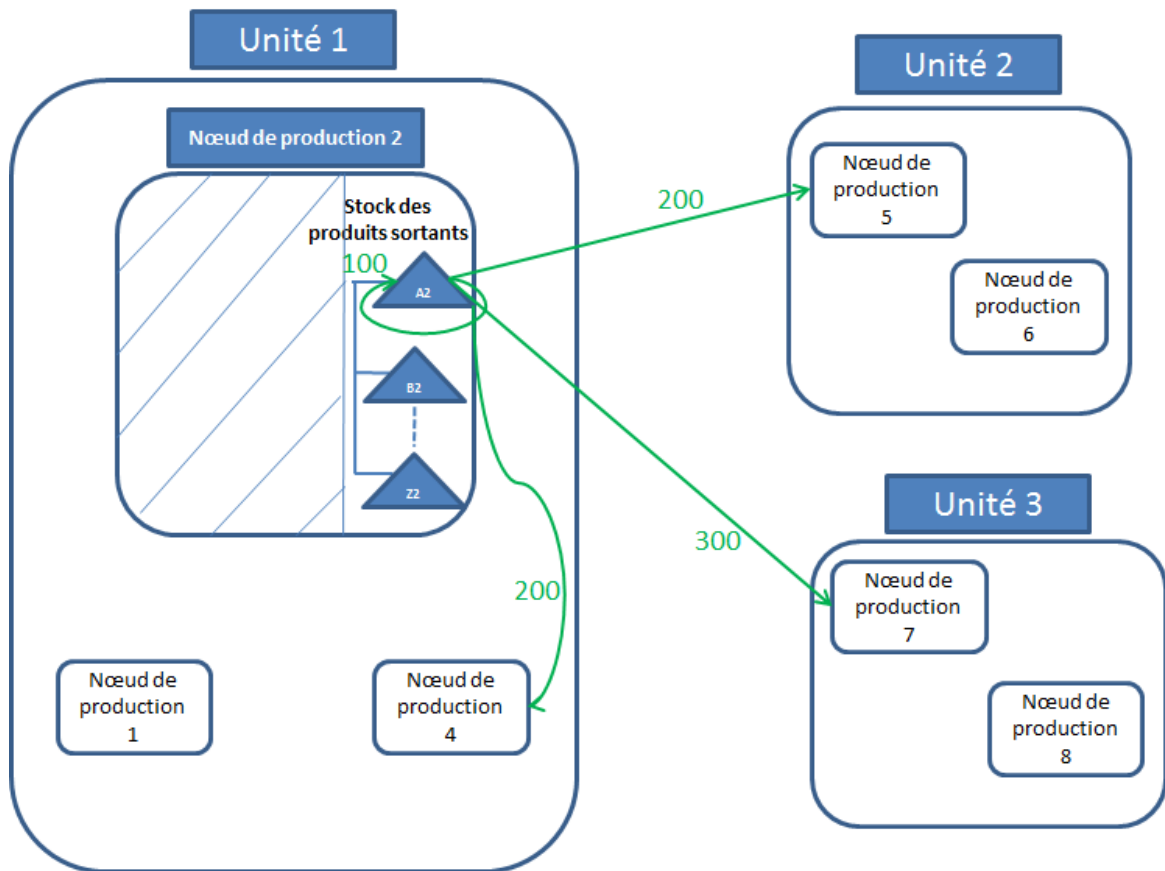


Figure 10: Les consignes de distribution d'un produit donné de la sortie d'un nœud de production vers les différents nœuds du réseau.

Une fois la politique de production-distribution extraite, elle doit servir à réellement guider les opérateurs dans l'opérationnalisation du réseau. Nous proposons donc un mécanisme de mise en œuvre des politiques tactiques qui permet d'exécuter au niveau opérationnel la politique établie au niveau tactique. Ce mécanisme d'assure que l'exécution va converger vers les cibles établies au niveau tactique. Ce mécanisme est basé sur le calcul de l'écart en pourcentage entre la cible et la situation courante.

Voyons un exemple pour illustrer le fonctionnement du mécanisme proposé. Supposons que la politique établie au niveau tactique spécifie que la production du produit A à partir de l'unité 1 pour le premier mois (1000 unités) doit servir de la manière suivante :

- 800 unités acheminées vers l'unité 2;
- 100 unités acheminées vers l'unité 3;
- 100 unités de A conservées en stock.

Pendant le mois, l'unité 1 devra garder le compte des quantités réellement acheminées vers les unités 2 et 3 et celles qui ont été gardées en stock. Pendant le mois, à chaque fois qu'un nouveau lot sera produit, on l'affectera à la destination pour laquelle on est le plus loin d'atteindre la cible. Autrement dit, on suppose que pour chaque flux (produit/origine/destination), l'unité d'affaires maintient les trois variables suivantes : la cible, la quantité affectée jusqu'à maintenant, et l'écart entre les deux. On affecte les nouveaux lots à la destination pour lequel l'écart relatif est le plus grand.

Ainsi, même si au niveau de l'exécution surviennent des aléas qui empêchent de produire exactement les quantités prévues par le niveau tactique, le mécanisme assure que les quantités produites seront allouées aux différentes destinations dans les proportions établies au niveau tactique.

Le même principe est utilisé pour les cibles en termes d'utilisation des processus de transformation. Pour un nœud de production ayant une capacité d'utilisation possible de 12 heures, LogiLab nous fournit les résultats suivants : le processus A doit être utilisé pendant 8 heures (66,66% de la durée d'utilisation possible du nœud de production) et le processus B doit être utilisé pendant 4 heures (33,33% de la durée d'utilisation possible du nœud de production). Maintenant, si dans la vraie vie la durée réelle possible d'utilisation du nœud de production est de 6 heures, le mécanisme assurera que le processus A va être utilisé pendant 4 heures (66,66% de la durée d'utilisation réelle du nœud de production) et le processus B va être utilisé pendant 2 heures (33,33% de la durée d'utilisation réelle du nœud de production).

### 2.1.5. Étape 5 : *Définir manuellement les politiques d'exécution*

La plupart des entreprises industrielles sont organisées en réseaux de sites de production et de distribution qui procurent des matières premières, puis les transforment en produits intermédiaires et finis, ensuite, distribuent les produits semi-finis entre les différents sites du réseau et les produits finis aux clients. Dans ce réseau plusieurs décideurs sont

responsables de différentes parties de la chaîne de création de valeur : la production, les opérations, la logistique, la gestion du matériel et des matières, la distribution, la gestion du transport, etc.

Dans la pratique, la performance du réseau ne dépendra pas seulement de la politique de production-distribution du réseau (discutée dans la section précédente). La gestion du transport, la gestion des stocks dans les différents sites et les différents éléments de la logistique d'une chaîne de création de valeur, ont des conséquences sur la performance d'un réseau. On les nomme *politiques d'exécution*.

Ces politiques d'exécutions (ex: les règles à utiliser pour le chargement des camions et l'expédition) ne peuvent pas être extraites de notre plan tactique, mais le décideur peut facilement formuler un ensemble de politiques alternatives à tester (étape 5).

À titre d'exemple, on considère les deux types de politiques d'exécution suivantes : (1) le mode de chargement des camions (en termes de produits), et (2) les règles de routage des camions (en termes de destinations).

Pour le mode de chargement des camions, on pourrait concevoir les deux politiques suivantes :

- Un seul type de produit par camion;
- Plusieurs types de produits par camion.

Pour les règles de gestion des destinations des camions, le décideur pourrait s'interroger sur la valeur des deux politiques suivantes :

- Un camion peut faire le transfert de sa charge de produits vers une seule destination ou il va déposer toute sa charge;
- Un camion peut desservir plusieurs destinations où il dépose ses charges, selon les destinations des produits qu'il transporte.

## **2.2. Phase B – Anticipation du niveau opérationnel / exécution**

Les étapes 4 et 5 de la phase A nous ont permis de définir plusieurs combinaisons de politiques de production-distribution et de politiques d'exécution. Dans la phase B, nous

proposons l'utilisation de la simulation afin d'évaluer les différentes combinaisons de politiques dans le fonctionnement du réseau.

Notre cadre est supporté par un modèle de simulation détaillé d'un réseau de production-distribution. Il utilise la simulation à événements discrets. La plupart des logiciels disponibles pour simuler les opérations de fabrication et de transport stochastiques sont basés sur ce paradigme de la simulation à événements discrets.

Notre modèle de simulation a été développé en utilisant le logiciel SIMIO [36]. C'est un logiciel de simulation orientée objet. Il s'agit d'un outil de modélisation de systèmes à événements discrets qui fournit des modèles 3D animés.

Dans SIMIO, l'analyste peut construire ses modèles en utilisant les objets fournis dans la bibliothèque d'objets standards. Il est possible également d'étendre le comportement de la bibliothèque en utilisant des processus développés au sein du logiciel.

Un objet est défini par ses *propriétés*, des *états*, des *événements*, une *vue externe* et des *processus*. Ce sont les concepts clés de SIMIO à comprendre pour la construction et l'utilisation d'objets. Les *propriétés* sont des valeurs d'entrée qui peuvent être spécifiées par l'utilisateur de l'objet. Par exemple, un objet représentant un « serveur » peut posséder une propriété qui spécifie le temps de service (exprimée par l'utilisateur sous la forme d'une distribution). Par conséquent, lorsque l'utilisateur place l'objet serveur dans le modèle, il spécifie également la valeur de la propriété.

Les *états* d'un objet sont des valeurs dynamiques qui changent et qui peuvent changer pendant la simulation. Par exemple, l'état d'occupation du « serveur » est modifié par chaque fois que le service d'un client commence et se termine. La *vue externe* d'un objet est la représentation graphique en 3D de l'objet. C'est ce que l'utilisateur peut voir en cours d'exécution de la simulation.

Les *processus* dans un objet forment un modèle interne qui définit la façon dont l'objet répond à des *événements* spécifiques.



De plus, une fonctionnalité importante de SIMIO est qu'une fois le modèle est construit, l'utilisateur peut en faire un objet qui sera réutilisé dans un autre modèle. Par la suite, le modèle peut être placé comme un sous-modèle dans un modèle de niveau supérieur. Ainsi la modélisation hiérarchique est très simple dans SIMIO.

La structure d'un projet avec SIMIO est faite en cinq étapes : (a) définir le réseau, les paramètres et les activités relatifs aux modèles du réseau; (b) définir toutes les variables que l'utilisateur va utiliser dans ses modèles et dans les mesures de performances du réseau; (c) glisser les objets dans la fenêtre de travail de chaque sous-modèle; (d) définir les propriétés et ajouter des « processus » qui expriment la logique des sous-modèles pour chaque objet ajouté; (e) glisser les sous-modèles dans la fenêtre du modèle général et remplir les paramètres de chaque sous-modèle selon le cas sous étude.

Nous référons le lecteur au livre de Kelton et al. [36] pour plus d'informations sur l'utilisation du logiciel SIMIO.

### 2.2.1. Étape 6 : Simulation détaillée (niveau opérationnel/exécution)

Dans cette partie, on va montrer comment la simulation peut être utilisée pour évaluer quelle serait la performance attendue d'une entreprise qui mettrait en œuvre les politiques définies au niveau tactique. Comme la simulation tient compte de la nature stochastique de différents événements (aléas de production et de transport, etc.), l'évaluation sera beaucoup plus réaliste que de se fier à la valeur de la fonction-objectif du plan tactique (le modèle tactique ne tient pas compte de la nature aléatoire des intrants, la nature stochastique du transport, de la production et les pannes machines, etc.). De plus, cette évaluation tient compte des politiques d'exécution et simule le mécanisme utilisé pour désagréger les politiques de niveau tactique. Finalement, le temps n'est plus agrégé.

Le modèle de simulation utilisé à ce niveau est donc beaucoup plus détaillé que le modèle d'optimisation utilisé au niveau tactique. Il permet de simuler un fonctionnement réel du réseau et d'évaluer conjointement les politiques d'exécution et la politique de production-distribution, en intégrant les différents aléas et les paramètres des unités d'affaires, les nœuds de production associés à chaque unité d'affaires, ainsi que leurs propriétés et leurs

processus. Plusieurs répliques peuvent être réalisées de manière à obtenir des résultats comportant des intervalles de confiance.

Il faut noter que nous proposons ce cadre pour tout réseau de création de valeur qui fonctionne en flux poussés et pour lequel nous pourrions être en présence d'aléas. Cependant, la preuve de concept, présentée dans le chapitre suivant, n'intègre pas les aspects aléatoires relatifs à la production et au transport. L'objectif de ce mémoire est de montrer comment diriger la production et le transport journalier dans un réseau de création de valeur à partir des politiques de production-distribution et des politiques d'exécutions et de choisir la meilleure combinaison de politiques.

Dans ce qui suit, on exposera plus en détails le modèle de simulation développé dans le cas général.

### **Simulation des politiques de production-distribution**

Le réseau est modélisé par un ensemble de nœuds de production qui sont reliés entre eux par des arcs, comme montrent la Figure 9 et la Figure 10. Cependant, par défaut, SIMIO ne peut pas émuler automatiquement le mécanisme de mise en œuvre des politiques tactiques proposé à la section 2.1.4. En fait, lorsqu'on modélise un réseau avec SIMIO, si on a deux arcs qui sortent d'un nœud, SIMIO nous demande par défaut les poids respectifs qu'il va utiliser pour choisir aléatoirement la destination de chaque produits à envoyer. De plus, en ce qui a trait aux choix des processus à utiliser, SIMIO fonctionne habituellement par priorité; encore une fois, une modification était nécessaire pour supposer le mode de sélection des processus que nous avons défini à la section 2.1.4.

Pour pouvoir affecter des destinations aux entités et gérer ces choix d'exécution des processus dans chaque nœud de production selon le mécanisme proposé à la section 2.1.4, nous avons défini des nouveaux objets et processus SIMIO. Grâce aux ajouts que nous avons implémentés dans SIMIO, à chaque fois qu'une machine (ou un équipement, etc.) est libre, le nœud de production choisit le processus ayant le plus grand écart relatif entre la cible mensuelle d'utilisation de ce dernier (en nombre d'heures) et la situation courante

(utilisation du processus jusqu'à maintenant). Il est à noter, qu'on tient compte de la disponibilité des produits entrants.

Une fois qu'un produit est fabriqué, l'usine doit lui affecter une destination. Le choix de cette dernière est établi selon l'écart relatif entre la cible mensuelle (en terme de quantité maximale à envoyer) et la situation courante (qui est la somme des quantités envoyées jusqu'à maintenant du même type de produit), une fonctionnalité que nous avons dû ajouter à SIMIO en programmant nos propres objets.

### **Simulation des politiques d'exécution**

Pour chacune des différentes combinaisons de politiques d'exécution, on doit proposer une variante différente du modèle de simulation. Pour la gestion de la destination des camions, ceci est géré automatiquement par SIMIO. Cependant, pour le mode de remplissage des camions (un produit seul dans un camion, ou combinaison de plusieurs produits), SIMIO ne le gère pas automatiquement. SIMIO a donc dû être modifié en ce sens (en définissant de nouveaux objets et processus).

La Figure 11 présente un exemple d'un modèle de simulation avec SIMIO.

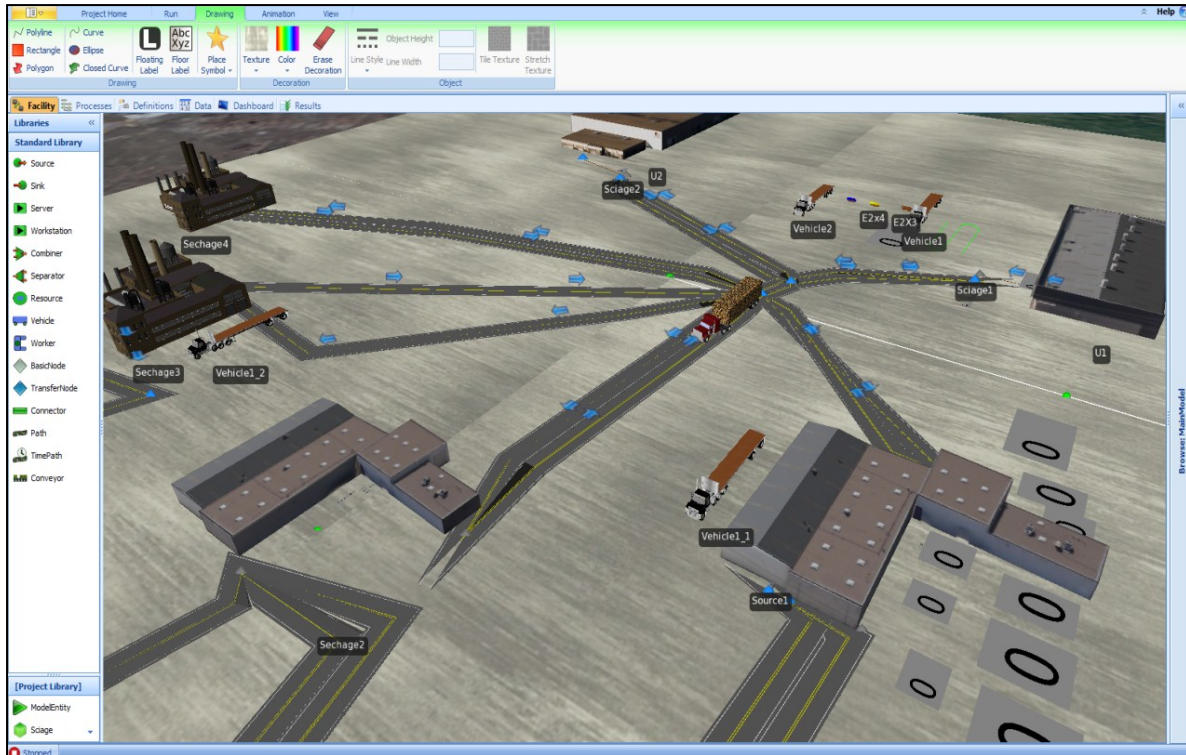


Figure 11. Modèle de simulation.

### 2.2.2. Étape 7 : Analyse

À partir des résultats de la simulation, les décideurs ont accès à un plus large éventail d'indicateurs que ceux obtenus à partir de l'optimisation au niveau tactique. Cette première permet d'anticiper de manière plus précise la performance d'un réseau donné, contrairement à la fonction-objectif du modèle d'optimisation au niveau tactique. Les résultats de simulation de chaque combinaison de politiques seront analysés par les décideurs. Cette analyse peut être basée sur le profit, le coût ou le pourcentage d'utilisation des ressources. Ainsi, les décideurs pourront, d'une part, identifier la meilleure combinaison de politiques, et, d'autre part, suggérer des modifications aux stratégies d'exécution et de politique de production-distribution. Ils pourront alors procéder à une nouvelle évaluation et obtenir une nouvelle combinaison de politiques optimales de pilotage du réseau.

## Chapitre 3: Preuve de concept

Au chapitre précédent, nous avons proposé un cadre permettant de déterminer et d'exécuter la meilleure combinaison de politiques de pilotages d'un réseau de production-distribution des produits forestiers. En effet, il permet aux utilisateurs de schématiser et d'optimiser un réseau à l'aide du logiciel LogiLab, en recourant aux prévisions de la demande et les caractéristiques des différentes unités d'affaires constituant le réseau. À partir des résultats de l'optimisation, on peut extraire une politique de production-distribution. Cette dernière pourra être simulée conjointement avec les politiques d'exécution définies par les décideurs (à l'aide du modèle de simulation que nous avons développé). Cette simulation va nous fournir également une meilleure évaluation de la performance attendue de chaque combinaison de politiques sur notre réseau (en comparaison avec le modèle tactique de LogiLab), notamment grâce à la prise en compte de la désagrégation du temps qui est introduite par la simulation. Dans ce chapitre, nous allons appliquer ce cadre sur un cas numérique inspiré d'une situation industrielle réelle de taille réduite. L'objectif de cette application est de montrer comment, à partir de la politique de production-distribution extraite et des politiques d'exécution, on peut réellement guider les opérateurs dans l'opérationnalisation du réseau même si les cibles ne sont pas exactement atteignables (le tactique relaxe plusieurs contraintes). Par ailleurs, l'objectif du cadre est de permettre l'évaluation, à l'aide de la simulation, des différentes combinaisons de politiques et la sélection des meilleures combinaisons. Même si l'application numérique n'intègre pas les aspects aléatoires relatifs à la production et au transport, rien n'empêcherait une entreprise de le faire de manière à ce que la simulation évalue encore plus précisément les politiques. Le cadre introduit au chapitre précédent ne l'empêche pas.

Afin de démontrer l'applicabilité du cadre, le présent chapitre est organisé comme suit : d'abord la section 3.1 présente un cas réel d'un réseau de production-distribution de bois d'œuvre et décrit la problématique du réseau. Ensuite, la section 3.2 présente l'application du cadre pour un cas numérique inspiré du cas réel, ainsi que l'ensemble des résultats et des analyses déterminés par le cadre.

### 3.1. Cas industriel - Coordination dans un réseau régional de production et de distribution de bois d'œuvre

Dans ce qui suit, nous allons présenter le cas réel d'un réseau de production-distribution de bois d'œuvre.

#### 3.1.1. Description du cas industriel

Le cas industriel est un réseau constitué par un groupe de scieries localisées au Canada et produisant du bois de construction. Ces usines appartiennent à une seule entreprise. Chaque scierie a des installations permettant d'effectuer l'une ou plusieurs des activités suivantes : sciage, séchage et rabotage (voir Figure 12). Chacune des opérations peut être exécutée à l'une ou l'autre des scieries, sans prendre en considération l'endroit où l'opération précédente a été fait. Ainsi, les produits sciés à la scierie 1 peuvent être séché à une autre scierie, même si la scierie 1 possède l'installation permettant le séchage.

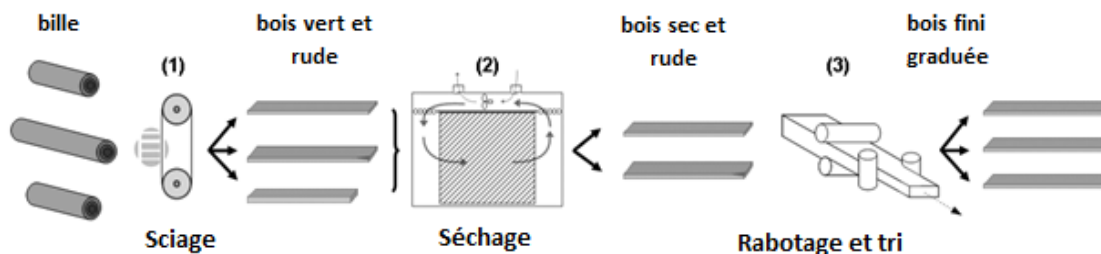


Figure 12. Processus de production de bois d'œuvre.  
(D'après [6]).

En pratique, l'étape avant le début de transformation du bois dans la scierie est la récolte de bois et la production des billots. Elle se fait en forêt, généralement par des entrepreneurs autonomes selon des plans de travail pré-établis. Le processus de sciage (1) découpe ensuite les billots de manière à obtenir des pièces de bois qu'on appelle sciages verts. Un sciage est caractérisé par la scierie à laquelle l'opération sciage a eu lieu, et les caractéristiques physiques : dimension (2"x3", 2"x4", etc.), longueur (8 pieds, 12 pieds, etc.) et essence (sapin, épinette, etc.). À partir d'un billot, on obtiendra plusieurs sciages de dimension et longueur différentes. Les scieries conservent des historiques de production qui permettent d'estimer les quantités de chaque type de sciage en provenance d'un type de billot. Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas de contrôle sur la récolte et le sciage. Cette activité a

été planifiée par l'entreprise en prenant en considération l'arrivage, la disponibilité et la capacité de la scierie. Par conséquent, les quantités de chaque type de sciages vert produit par chaque scierie et pour chaque période (pour 12 périodes d'un mois) sont déjà déterminées. Le coût de sciage est défini par produit par MPMP (Mille pieds-mesure de planche<sup>1</sup>) pour chaque scierie et à chaque période. L'opération de séchage (2) est utilisée pour diminuer la teneur en humidité du bois vert. Les produits issus de l'opération sciage conservent les mêmes caractéristiques après l'opération de séchage. Le séchage est généralement réalisé par lots dans des grands séchoirs. La capacité physique des séchoirs est en MPMP, multiplié par le nombre d'heures de disponibilité pour le séchage à chaque période. La durée de séchage varie selon le moment de l'année, les essences et les dimensions du bois. Il faut noter que chaque unité de volume de bois vert entrant au séchage, ressort comme bois sec, sans perte de volume ni changement de caractéristiques. Le coût de séchage est considéré par MPMP qui varie selon la scierie, la période et l'essence.

Enfin, le rabotage (3) est le processus effectué pour régler le bois brut de sciage à la dimension standard, d'assurer une bonne finition de surface et de supprimer tous les défauts et c'est à cette opération que la longueur et la qualité finale du bois d'œuvre sont connus. Il est assumé que tous les produits pouvant être rabotés à une période donnée seront vendus à cette même période. On considère aussi, que tous les produits doivent se rendre à l'opération de rabotage pour qu'ils puissent être vendus. La génération de revenu dans ce réseau se fait par la vente des produits rabotés. Pour chaque scierie, on spécifie pour l'activité de rabotage les produits consommés, les revenus qui en seront tirés, le volume raboté par heure en MPMP, ainsi que le coût par MPMP à chaque période. Il faut noter que le rabotage d'un lot de de sciages secs, produit simultanément de nombreux produits différents variant en longueur, qualité et valeur commerciale. De même, le panier de produits obtenu et les revenus peuvent varier selon la scierie à laquelle le produit a été scié et la scierie où il a été raboté. Il faut donc considérer la scierie d'origine de l'opération sciage comme étant une caractéristique du produit intermédiaire. En résumé, l'analyse de données historiques de l'opération rabotage de chaque scierie lui permet de déterminer la

---

<sup>1</sup> L'unité standard de mesure du volume du bois d'œuvre, en Amérique du nord

valeur commerciale qui peut être attendu du rabotage des différents produits bois, basé sur la scierie origine de l'opération sciage, essence, longueur, dimension et la scierie où se fait le rabotage.

### 3.1.2. Description de la problématique du réseau

L'entreprise étudiée possède de nombreuses scieries. Une scierie donnée peut être en mesure d'effectuer une ou plusieurs des activités (sciage, séchage, rabotage) en fonction de l'équipement disponible. Certaines de ces scieries ne disposent pas de l'équipement nécessaire pour effectuer le sciage des billots ou le séchage ou le rabotage. D'autres ont les équipements pour le sciage, le séchage et le rabotage du bois. La Figure 13 montre la disposition géographique des scieries et les équipements que chacune possède. Quand une scierie n'a pas un des équipements ou la capacité nécessaire pour faire une opération, le bois doit être transporté vers une autre scierie pour poursuivre sa transformation.



Figure 13. Les processus et les localisations des usines.



Pour certaines scieries, une spécialisation de l'activité de rabotage a été faite. Cette spécialisation peut limiter les types de produits pouvant être rabotés à une scierie donnée. En contrepartie, l'opération peut être plus productive. Toutefois, cette spécialisation nécessite le transport d'un grand volume de bois non rabotés entre les différentes scieries.

Le transport est une activité importante qui peut être gérée par des entrepreneurs indépendants, ou par l'entreprise elle-même si elle possède une flotte de véhicules. Ici, le transport des produits forestiers se fait par camion.

Pour chaque transport possible entre les origines (usines) et les destinations (usines), un coût distinct par volume de bois vert et de bois sec transporté est spécifié. Un coût unitaire par Mpmp est suffisant pour approximer les coûts de transport. Afin de prendre en considération le fait que moins de bois peut être transporté par chargement durant les périodes de gel et dégel, le coût de transport varie par période.

Les opérations de production et de distribution sont les deux fonctions opérationnelles les plus importantes dans la chaîne de création de valeur. Pour optimiser les performances opérationnelles dans un réseau, il est nécessaire d'intégrer ces deux fonctions et les planifier conjointement.

De nombreuses entreprises gèrent ces deux fonctions de façon autonome avec peu ou pas de coordination. Toutefois, ceci conduit à une augmentation des coûts de détention des stocks et des délais plus longs d'exécution des produits à travers la chaîne de création de valeur. Par conséquent les entreprises peuvent réaliser des économies et améliorer le service et satisfaire les clients en optimisant la production et la distribution d'une manière intégrée.

L'interdépendance entre la production et la distribution, et le compromis entre les coûts qui leur sont associés ne sont pas les seuls facteurs qui affectent la performance de la chaîne de création de valeur. En plus de la production et de la distribution, il y a d'autres facteurs tels que les stocks, les aléas de production et de transport, et les capacités qui jouent aussi un rôle important.

## 3.2. Application du cadre

Dans cette section on va appliquer le cadre pour un cas numérique inspiré du cas réel présenté à la section 3.1. L'étape 1 du cadre présentera les différentes unités d'affaires qui constituent le réseau d'études et leurs paramètres relatifs. Aussi, les différentes autres étapes seront détaillées relativement à ce cas numérique. Quant à l'étape 7 du cadre, elle présentera les résultats les plus pertinents, ainsi qu'une analyse du réseau.

### 3.2.1. Phase A – optimisation agrégée au niveau tactique

#### *(a) Étape1 : Modélisation du réseau de création de valeur*

Nous considérons un réseau constitué de trois scieries. Chacune est constituée d'une unité de sciage, d'une unité de séchage et d'une unité de rabotage. Les scieries sont connectées entre elles par des routes de transport. La Figure 14 présente le modèle du cas étudié à l'aide de LogiLab.

Afin de pouvoir modéliser le cas d'étude sous LogiLab, les types d'entités à modéliser ont été identifiés comme suit :

- Les unités d'approvisionnements qui représentent les unités de sciage
- Les unités de transformation : séchage et rabotage;
- Le marché associé à cette entreprise;
- Les liens d'affaires entre les unités.

L'horizon de planification choisi pour cette application numérique n'est plus de cinquante-deux semaines (comme dans l'exemple du chapitre précédent) mais plutôt à deux périodes d'un mois. Ceci permettra de réduire le nombre de variables sans affecter notre objectif de monter comment diriger la production et le transport journalier dans un réseau à partir du plan tactique.

Comme dans le cas industriel, le plan de production de l'activité de sciage est déterminé à l'avance; on connaît les quantités produites de tous les produits pour toutes les périodes tactiques de production. Les données de production du sciage sont présentées au Tableau 1. Nous avons considéré qu'il y avait des stocks de départ réalistes (Tableau 5) afin d'éviter d'avoir un régime transitoire. Les caractéristiques des unités de séchages et des unités rabotages sont présentées dans le Tableau 2. Les caractéristiques des processus à l'unité

séchage 1 sont indiquées dans le Tableau 3. Les caractéristiques des processus à l'unité rabotage 1 sont indiquées dans le Tableau 4. Les prix de ventes des produits rabotés sont indiqués dans le Tableau 6.

Pour chaque lien d'affaires sous LogiLab, on inscrit la distance routière reliant deux entités données. Les différentes distances sont indiquées sur la Figure 14. Chaque lien se caractérise par, les produits à transporter, leurs coûts de transport respectifs, ainsi que la capacité du lien en termes de flux minimal et maximal. On note aussi que le transport se fait avec une flotte de 20 camions, ayant chacun une capacité de 5 Mpmp.

Tableau 1. Volume de production des unités de sciages (en Mpmp)

Unité de sciage	Produit A		Produit B	
	Période 1	Période 2	Période 1	Période 2
Sciage 1	600	1300	1700	1100
Sciage 2	1800	1300	800	1300
Sciage 3	1200	900	1800	750

Tableau 2. Caractéristiques des unités de séchage et de rabotage.

Unités d'affaires	Capacité (en heures)	Autres caractéristiques
Séchage 1	155	Un seul séchoir de capacité 50 Mpmp.
Séchage 2	155	Deux séchoirs de capacité chacun 40 Mpmp.
Séchage 3	155	Deux séchoirs de capacité chacun 50 Mpmp.
Rabotage 1	150	NA
Rabotage 2	150	NA
Rabotage 3	120	NA

Tableau 3. Caractéristiques des processus à l'unité de séchage 1.

<b>Processus</b>	<b>Produits entrants (Mpmp)</b>	<b>Produits sortants (Mpmp)</b>	<b>Durée du processus (minutes)</b>	<b>Coût du processus (\$)</b>
<b>Processus A1</b>	A1 vert	A1 sec	120	12
<b>Processus A2</b>	A2 vert	A2 sec	234	15
<b>Processus A3</b>	A3 vert	A3 sec	128	18
<b>Processus B1</b>	B1 vert	B1 sec	234	18
<b>Processus B2</b>	B2 vert	B2 sec	120	15
<b>Processus B3</b>	B3 vert	B3 sec	234	12

Tableau 4. Caractéristiques des processus à l'unité de rabotage 1.

<b>Processus</b>	<b>Produits entrants (Mpmp)</b>	<b>Produits sortants (Mpmp)</b>	<b>Durée du processus (minutes)</b>	<b>Coût du processus (\$)</b>
<b>Processus A1</b>	A1 sec	A1 raboté	8	40
<b>Processus A2</b>	A2 sec	A2 raboté	6	35
<b>Processus A3</b>	A3 sec	A3 raboté	7	37.5

Tableau 5. Stocks de départ

<b>Produits</b>	<b>Scierie 1</b>	<b>Scierie 2</b>	<b>Scierie 3</b>
A	200	0	100
B	0	200	100

Tableau 6. Prix de vente des produits rabotés à l'unité de rabotage 1.

<b>Produits</b>	<b>Prix (\$)</b>
<b>A1 raboté</b>	260
<b>A2 raboté</b>	240
<b>A3 raboté</b>	250

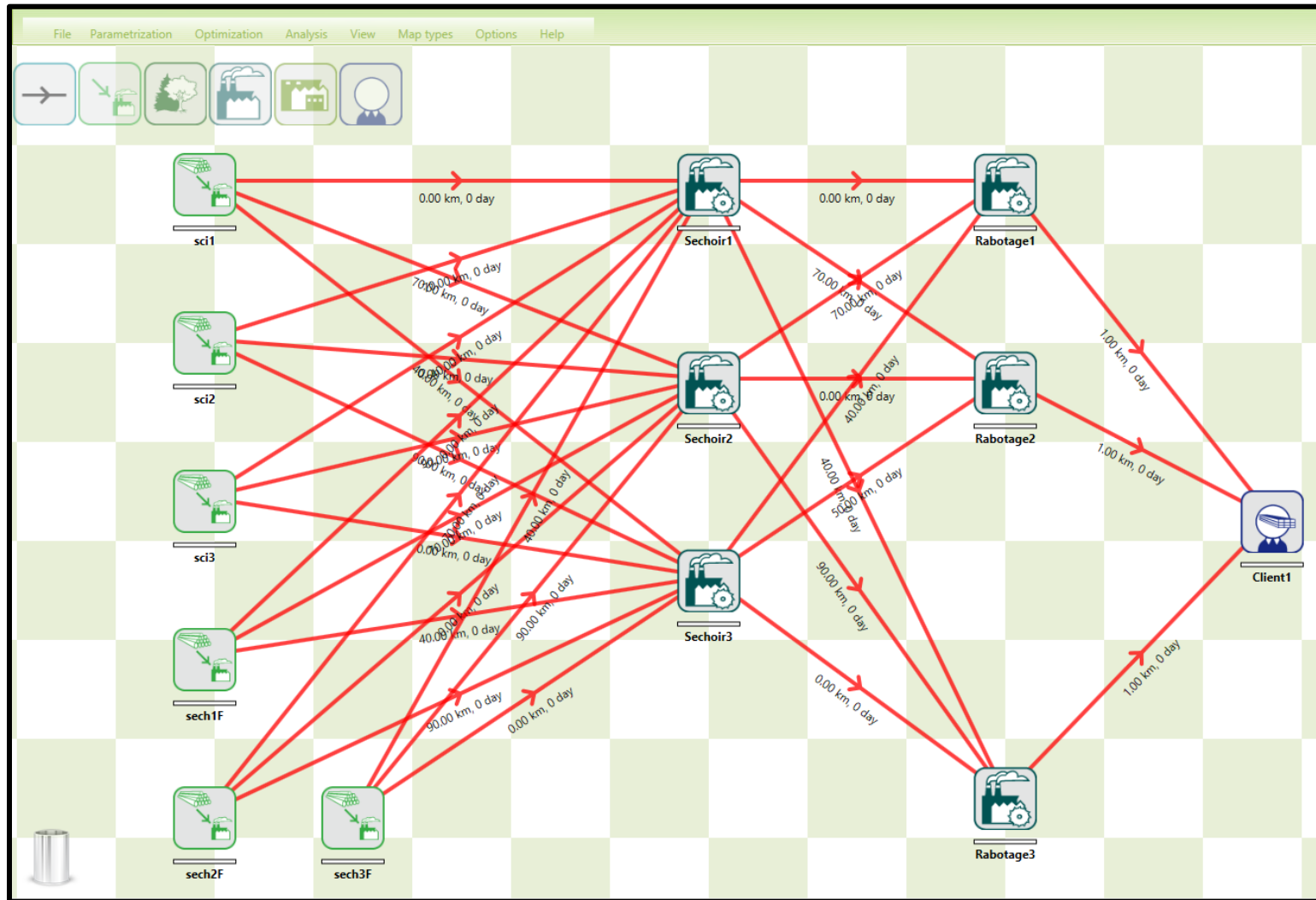


Figure 14. Modélisation du cas d'étude à l'aide LogiLab.

Les unités *sech1F*, *sech2F* et *sech3F* représentent les unités d’approvisionnement (sciage) qui contiennent les stocks initiaux des produits verts à chaque scierie.

*(b) Étape 2 : Optimisation des flux*

Une fois que la modélisation du réseau est réalisée, l’optimisation des flux multi-périodes est exécutée par LogiLab, en fonction de l’horizon de planification défini.

*(c) Étape 3 : Visualisation et analyse*

Le Tableau 7 résume les résultats pertinents de l’optimisation. On peut visualiser les résultats d’optimisation de chaque période dans la Figure 15 et la Figure 16. On remarque qu’il y a de nombreux transferts de produits entre les différentes scieries.

Tableau 7. Résultats de la solution LogiLab

<b>Profit total</b>	2352109 \$
<b>Taux d’utilisation d’unité séchoir 1</b>	91%
<b>Taux d’utilisation d’unité séchoir 2</b>	100%
<b>Taux d’utilisation d’unité séchoir 3</b>	100%
<b>Taux d’utilisation d’unité rabotage 1</b>	100%
<b>Taux d’utilisation d’unité rabotage 2</b>	100%
<b>Taux d’utilisation d’unité rabotage 3</b>	100%

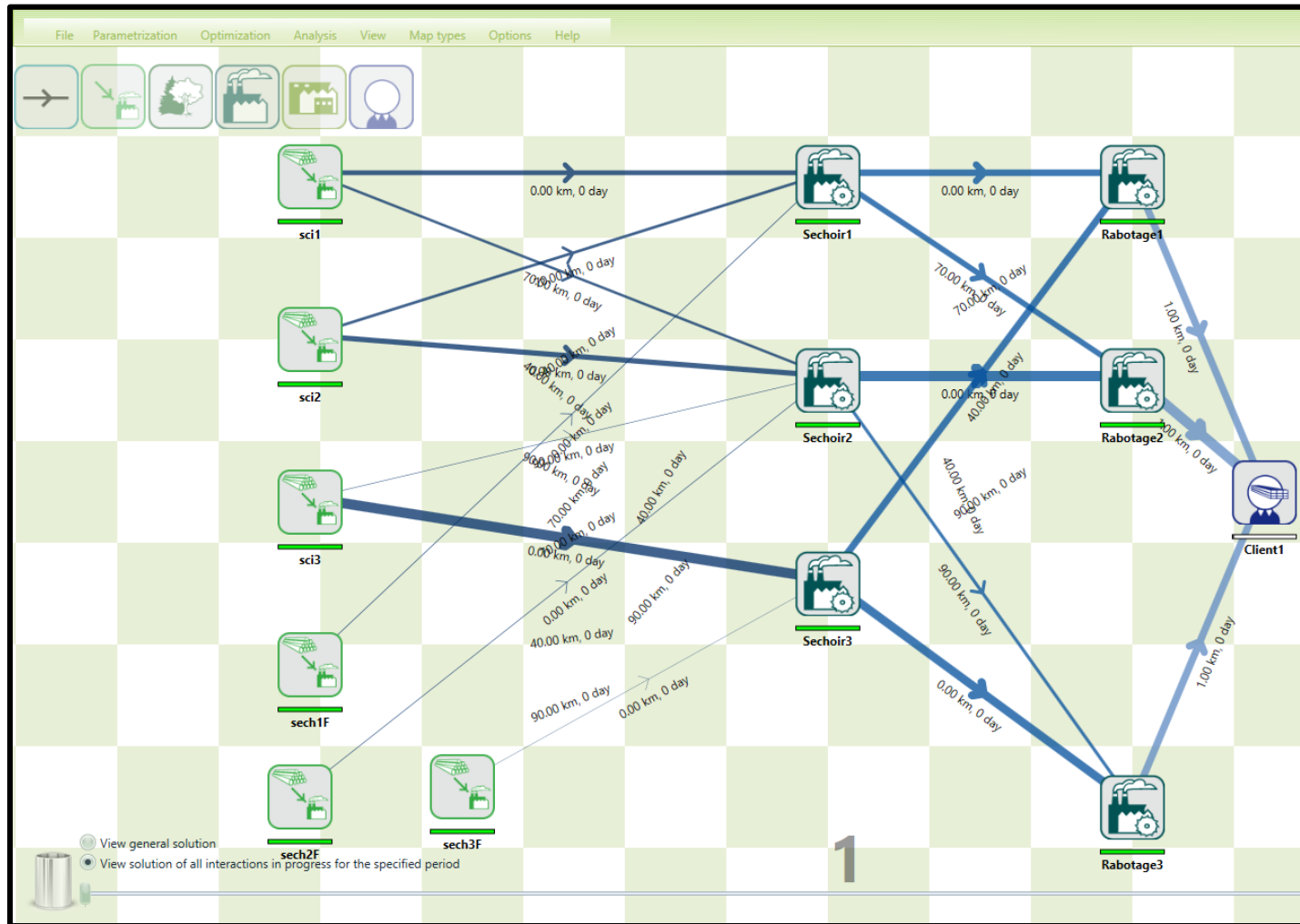


Figure 15. Visualisation du plan de production et de distribution de la période 1 à l'aide de LogiLab.



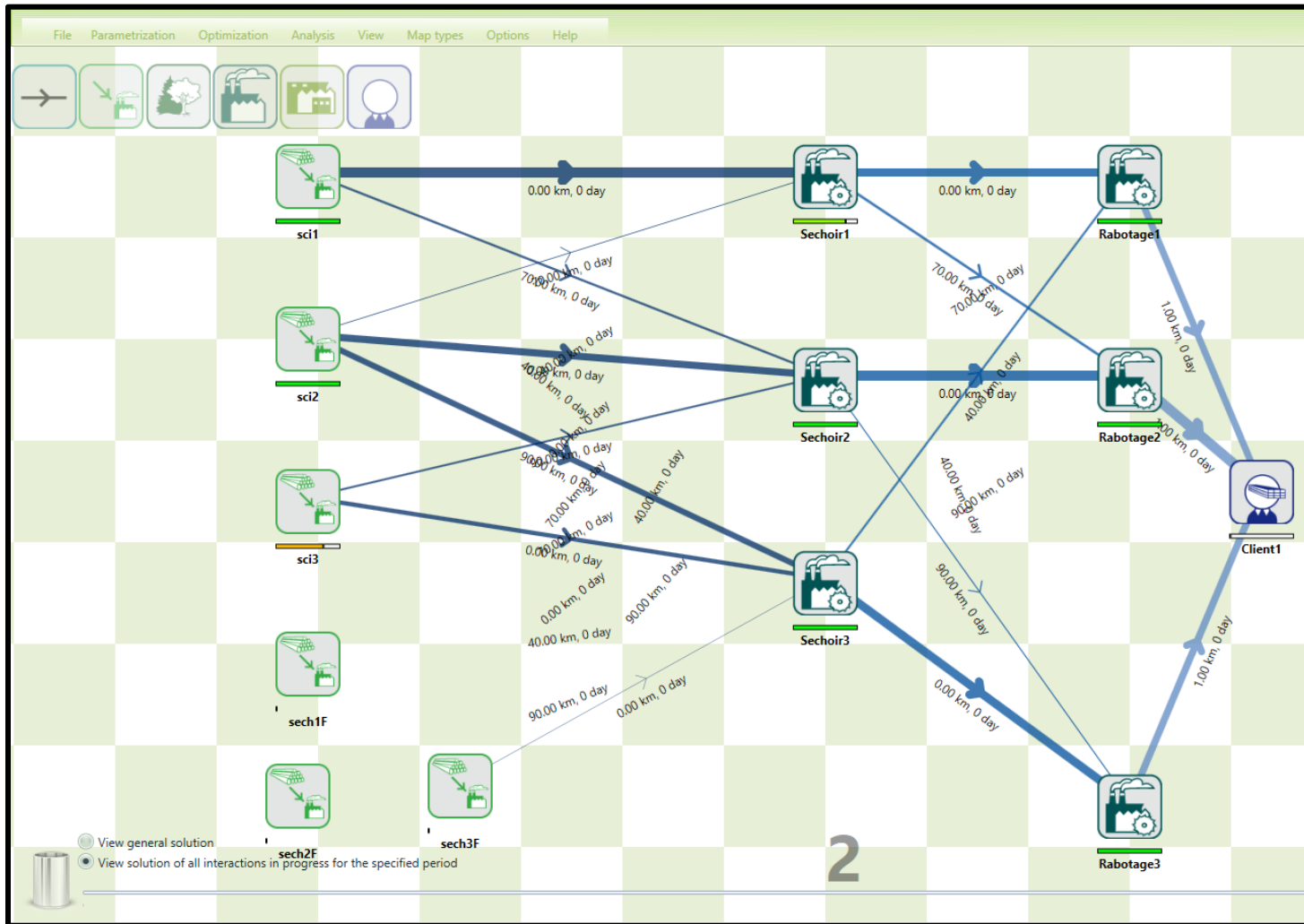


Figure 16. Visualisation du plan de production et de distribution de la période 2 à l'aide de LogiLab.

*(d) Étape 4 : Extraction automatique des politiques de production-distribution*

À partir des résultats de l'optimisation, nous avons fait une extraction des cibles de la politique de production-distribution telles que indiquées dans la section 2.1.4. Elles sont présentées dans le Tableau 8, le Tableau 9, le Tableau 10, le Tableau 11, le Tableau 12, le Tableau 13, le Tableau 14, le Tableau 15 et le Tableau 16.

Tableau 8. Les consignes de production à l'unité de séchage 1.

<b>Processus à l'unité séchage 1</b>	<b>Consignes d'utilisation de chaque processus (heures) Période 1</b>	<b>Consignes d'utilisation de chaque processus (heures) Période 2</b>
<b>Processus A1</b>	18,55	65,32
<b>Processus A2</b>	57,62	14,82
<b>Processus A3</b>	0	0
<b>Processus B1</b>	78,83	45,78
<b>Processus B2</b>	0	0
<b>Processus B3</b>	0	0

Tableau 9. Les consignes de production à l'unité de séchage 2.

<b>Processus à l'unité séchage 2</b>	<b>Consignes d'utilisation de chaque processus (heures) Période 1</b>	<b>Consignes d'utilisation de chaque processus (heures) Période 2</b>
<b>Processus A1</b>	0	0
<b>Processus A2</b>	83,68	43,36
<b>Processus A3</b>	0	0
<b>Processus B1</b>	109,19	79,45
<b>Processus B2</b>	92,3	117,75
<b>Processus B3</b>	24,83	69,44

Tableau 10. Les consignes de production de l'unité de séchage 3.

<b>Processus à l'unité séchage 3</b>	<b>Consignes d'utilisation de chaque processus (heures) Période 1</b>	<b>Consignes d'utilisation de chaque processus (heures) Période 2</b>
<b>Processus A1</b>	0	0
<b>Processus A2</b>	0	198
<b>Processus A3</b>	90	33,9
<b>Processus B1</b>	0	7,4
<b>Processus B2</b>	0	0
<b>Processus B3</b>	220	70,7

Tableau 11. Les consignes de production à l'unité de rabotage 1.

<b>Processus à l'unité rabotage 1</b>	<b>Consignes d'utilisation de chaque processus (heures) Période 1</b>	<b>Consignes d'utilisation de chaque processus (heures) Période 2</b>
<b>Processus A1sec</b>	31,40	110,24
<b>Processus A2sec</b>	39,85	10,27
<b>Processus A3sec</b>	78,75	29,49

Tableau 12. Les consignes de production à l'unité de rabotage 2.

<b>Processus à l'unité rabotage 2</b>	<b>Consignes d'utilisation de chaque processus (heures) Période 1</b>	<b>Consignes d'utilisation de chaque processus (heures) Période 2</b>
<b>Processus B1sec</b>	91,8	59,4
<b>Processus B2sec</b>	49,5	64,3
<b>Processus B3sec</b>	8,7	26,3

Tableau 13. Les consignes de production à l'unité de rabotage 3.

<b>Processus à l'unité rabotage 3</b>	<b>Consignes d'utilisation de chaque processus en nombre d'heures Période 1</b>	<b>Consignes d'utilisation de chaque processus en nombre d'heures Période 2</b>
<b>Processus A2sec</b>	31,45	88,75
<b>Processus B1sec</b>	0	2,74
<b>Processus B3sec</b>	88,55	28,51

Tableau 14. Les consignes de distribution à la scierie 1.

<b>Produits</b>	<b>Destinations</b>	<b>Volume à transférer à la période 1 (en Mpmp)</b>	<b>Volume à transférer à la période 2 (en Mpmp)</b>
<b>A1 vert</b>	Scierie 1	467	1633
	Scierie 2	0	0
	Scierie 3	0	0
<b>B1 vert</b>	Scierie 1	1012	587
	Scierie 2	688	513
	Scierie 3	0	0
<b>A1 sec</b>	Scierie 1	467	1633
	Scierie 2	0	0
	Scierie 3	0	0
<b>A2 sec</b>	Scierie 1	740	190
	Scierie 2	0	0
	Scierie 3	0	0
<b>B1 sec</b>	Scierie 1	0	0
	Scierie 2	1012	587
	Scierie 3	0	0

Tableau 15. Les consignes de distribution à la scierie 2.

<b>Produits</b>	<b>Destinations</b>	<b>Volume à transférer à la période 1 (en Mpmp)</b>	<b>Volume à transférer à la période 2 (en Mpmp)</b>
<b>A2 vert</b>	Scierie 1	740	190
	Scierie 2	583	280
	Scierie 3	0	1313
<b>B2 vert</b>	Scierie 1	0	0
	Scierie 2	1000	1300
	Scierie 3	0	0
<b>A2 sec</b>	Scierie 1	0	0
	Scierie 2	0	0
	Scierie 3	583	280
<b>B1 sec</b>	Scierie 1	0	0
	Scierie 2	688	513
	Scierie 3	0	0
<b>B2 sec</b>	Scierie 1	0	0
	Scierie 2	1000	1300
	Scierie 3	0	0
<b>B3 sec</b>	Scierie 1	0	0
	Scierie 2	149	450
	Scierie 3	0	0

Tableau 16. Les consignes de distribution à la scierie 3.

<b>Produits</b>	<b>Destinations</b>	<b>Volume à transférer à la période 1 (en Mpmp)</b>	<b>Volume à transférer à la période 2 (en Mpmp)</b>
<b>A3 vert</b>	Scierie 1	0	0
	Scierie 2	0	0
	Scierie 3	1250	468
<b>B3 vert</b>	Scierie 1	0	0
	Scierie 2	149	450
	Scierie 3	1515	478
<b>A2 sec</b>	Scierie 1	0	0
	Scierie 2	0	0
	Scierie 3	0	1363
<b>A3 sec</b>	Scierie 1	1250	468
	Scierie 2	0	0
	Scierie 3	0	0
<b>B1 sec</b>	Scierie 1	0	0
	Scierie 2	0	0
	Scierie 3	0	50
<b>B3 sec</b>	Scierie 1	0	0
	Scierie 2	0	0
	Scierie 3	1513	487

(e) *Étape 5* : Définir manuellement les politiques d'exécution

Dans notre cas d'études nous avons considéré les mêmes options de politiques d'exécution que celles présentées à la section 2.1.5. Ainsi, on peut distinguer différentes combinaisons possibles de politique de production-distribution (obtenue avec LogiLab) et de politiques d'exécution. Voici les trois combinaisons qu'on a choisies pour faire l'étude :

- Combinaison 1 : Politique de production-distribution de LogiLab + un camion ne peut transporter qu'un seul type de produit à la fois et vers une seule destination;

- Combinaison 2 : Politique de production-distribution de LogiLab + un camion ne peut transporter qu'un seul type de produit à la fois mais ces produits peuvent avoir des destinations différentes;
- Combinaison 3 : Politique de production-distribution de LogiLab + un camion peut transporter plusieurs types de produits à la fois et ces produits ont la même destination.

### 3.2.2. Phase B – Anticipation du niveau opérationnel / exécution

#### *(a) Étape 6 : Simulation détaillée (niveau opérationnel/exécution)*

Une fois que les combinaisons de politiques de pilotage du réseau sont définies, nous avons procédé à la simulation de chaque cas.

Pour toutes les combinaisons de politiques, nous considérons les hypothèses suivantes :

- Les zones de stockage contiennent les stocks de début de chaque produit au début de la simulation.
- Les unités d'affaires fonctionnent selon un agenda qui contrôle le fonctionnement et l'arrêt des machines. Si la machine contient un produit en cours de transformation et elle s'arrête selon l'agenda, la transformation s'arrête et continue la transformation quand le fonctionnement reprend.
- La flotte des camions fonctionne selon un agenda. Un camion en cours de déplacement continue de faire son transport même lorsque l'agenda indique l'arrêt.
- Un camion peut transporter plusieurs produits (si permis par la politique) mais ils doivent avoir le même état (vert, sec ou raboté) dans une même expédition;
- Tous les camions sont disponibles au début de la simulation.

La Figure 17 présente un aperçu du modèle développé avec SIMIO pour représenter le réseau de scieries pour la combinaison des politiques 1.

Il est à noter que la visualisation du modèle reste inchangée pour toutes les combinaisons de politiques, alors que les processus du modèle, développés dans SIMIO, changent selon la combinaison étudiée.



De plus, comme montre la Figure 18, le modèle permet de visualiser l'évolution des stocks de chaque produit dans chaque unité d'affaires, de voir en temps réel les quantités transférées entre les différentes scieries et l'utilisation de chaque processus. Il affiche aussi, les cibles périodiques de la politique de production-distribution.

On a simulé le fonctionnement du réseau en étude pour les trois combinaisons de politiques. Chaque scierie dans le modèle de simulation est constituée par les trois sous-modèles Simio suivants :

- Sous-modèle 1 – unité de sciage : représente l'approvisionnement en bois vert (sciages verts).
- Sous-modèle 2 – processus de distribution : représente le transfert du bois vert et sec d'une scierie vers les autres scieries du réseau.
- Sous-modèle 3 : unité de transformation : représente l'unité de séchage ou de rabotage.

Au niveau du sous-modèle 1, on génère l'arrivée des produits par période avec des temps inter-arrivés fixes. La formule suivante représente le calcul du temps inter-arrivé :

- $t_{A,1,période1} = \frac{720}{quantité_{A,1,période1}}$  : temps inter-arrivé pour le produit A à l'usine 1, à la période 1
- **720** : représente le nombre d'heures de fonctionnement pour une période donnée,
- **quantité<sub>A,1,période1</sub>** : représente le volume de A à l'usine 1 pour la période 1 (à partir du Tableau 1).

Le Tableau 17 représente les temps inter-arrivés en heure par produit, par unité de sciage et par période.

Tableau 17. Temps inter-arrivé par produit, par unité de sciage et par période (en heure)

Unité de sciage	Produit A		Produit B	
	Période 1	Période 2	Période 1	Période 2
Sciage 1	1,20	0,55	0,42	0,65
Sciage 2	0,40	0,55	0,90	0,55
Sciage . 3	0,60	0,80	0,40	0,96

Pour la validation du modèle, on a utilisé des indicateurs d'état (« Status Label » dans Simio, comme sur la Figure 18) sur différentes variables d'état, afin de suivre leur évolution en temps réel et vérifier s'il y a des erreurs dans le modèle. Par exemple, on a suivi les indicateurs des quantités reçues de chaque produit et dans chaque unité de sciage. On s'est assuré que les quantités reçues sont égales aux quantités indiquées au tableau 1. Quant à la distribution des produits (vert et sec), elle se fait selon la politique de distribution et le mode de remplissage des camions, représentés par le sous-modèle 2. Les produits de l'unité de sciage et les produits qui ont subis une transformation (dans les unités de séchage et de rabotage) sont envoyés vers la zone de distribution de l'usine. Une accumulation des produits se fait selon le mode de remplissage des camions. Par exemple, pour la combinaison 1, dès qu'un produit arrive à la zone de stockage avant distribution, l'inventaire sera actualisé, après, une accumulation par produit se fera (Le Tableau 18 présente la liste des produits), si la quantité cumulée par produit atteint la capacité d'un camion, elle sera considérée comme un lot pour un camion. Pour ce lot de produit, la destination qui lui sera affecté est celle ayant le plus grand écart en pourcentage entre la cible et la situation courante (voir section 2.1.4). Ensuite, le lot sera en file d'attente pour être expédié vers sa destination lorsqu'un camion sera disponible. Une fois le lot est dans le camion, l'inventaire des produits et les écarts en pourcentages seront actualisés.

Pour valider le modèle, on a suivi le déplacement des produits de leur réception dans la zone de stockage avant distribution (nœud de réception du sous-modèle 2), leur

accumulation, leur transformation en lot et on a suivi l'évolution des indicateurs d'inventaire par produit et les écarts en pourcentage, en temps réel.

Tableau 18. Liste des produits selon leurs caractéristiques dans tout le réseau

<b>A1 vert</b>	<b>A2 vert</b>	<b>A3 vert</b>
<b>B1 vert</b>	B2 vert	B3 vert
<b>A1 sec</b>	A2 sec	A3 sec
<b>B1 sec</b>	B2 sec	B3 sec

Le sous-modèle 3 représente les unités de transformation, qui sont gérées par la politique de production (voir section 2.1.4). Dès la réception des produits par les camions ou directement par la même scierie, on les stocke par produit (Tableau 18). La première étape consiste à -s'il y a une ressource disponible- choisir le processus ayant le plus grand écart en pourcentage entre la cible et la situation courante dont les quantités en stock des produits seraient supérieures aux quantités demandées par le processus choisi. Ensuite, on actualise les écarts en pourcentage. S'il n'y a pas les quantités suffisantes en stock, aucun processus ne sera choisi et la ressource reste en attente. Lorsque toutes les ressources sont occupées, les produits restent en stock en attente de libération d'une ressource. Lorsqu'une d'entre elles est libre, on applique de nouveau la première étape. Les produits transformés sont envoyés vers la zone de stockage avant distribution. On a vérifié la validité de ce modèle en suivant le déplacement des produits, leur réception, leur mise en stock avant transformation, le suivi en temps réel de l'évolution des indicateurs d'inventaire par produit et des écarts en pourcentage et la sélection du processus. Ce modèle s'avère, ainsi, valable à l'exercice de simulation du fonctionnement d'un réseau de scieries. La fin de l'exécution de ce modèle est conditionnée par le nombre de périodes fixé au lancement.

Tableau 19. Temps inter-arrivé des sciages (en heure).

Unité de sciage	Produit A		Produit B	
	Période 1	Période 2	Période 1	Période 2
Sciage 1	1,2	0,55	0,42	0,65
Sciage 2	0,4	0,55	0,9	0,55
Sciage 3	0,6	1,2	0,4	0,96

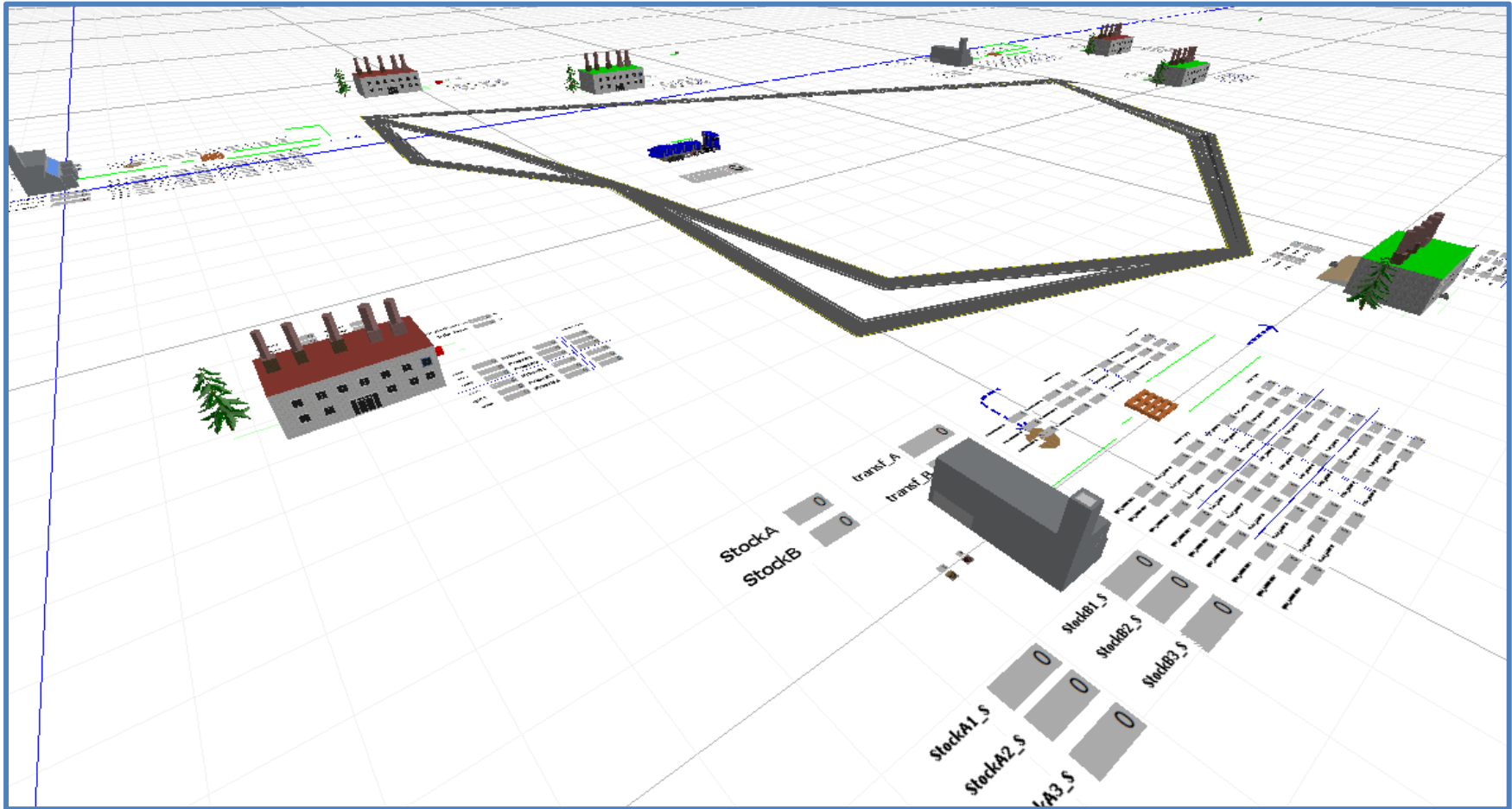


Figure 17. Modèle de simulation pour la combinaison 1.

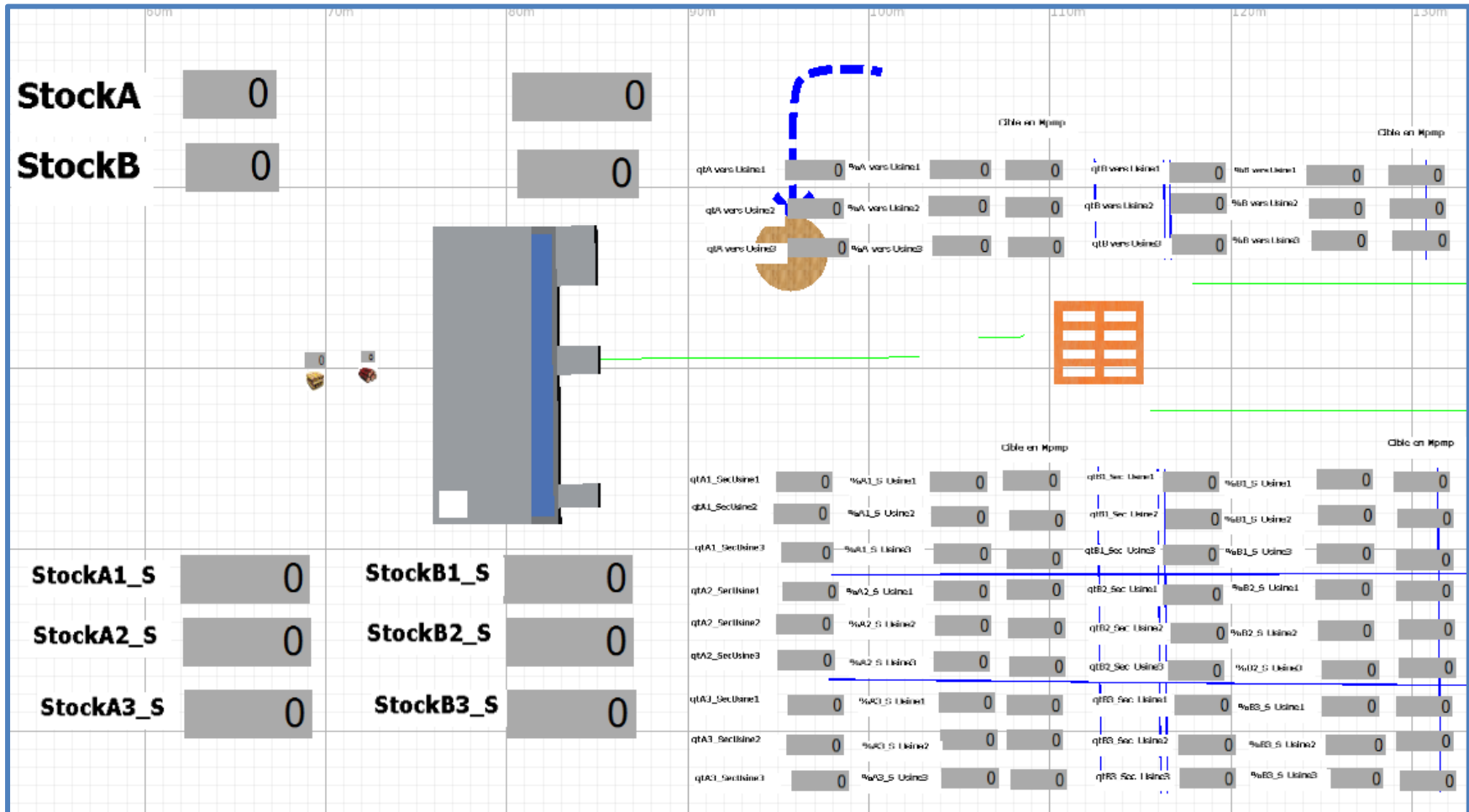
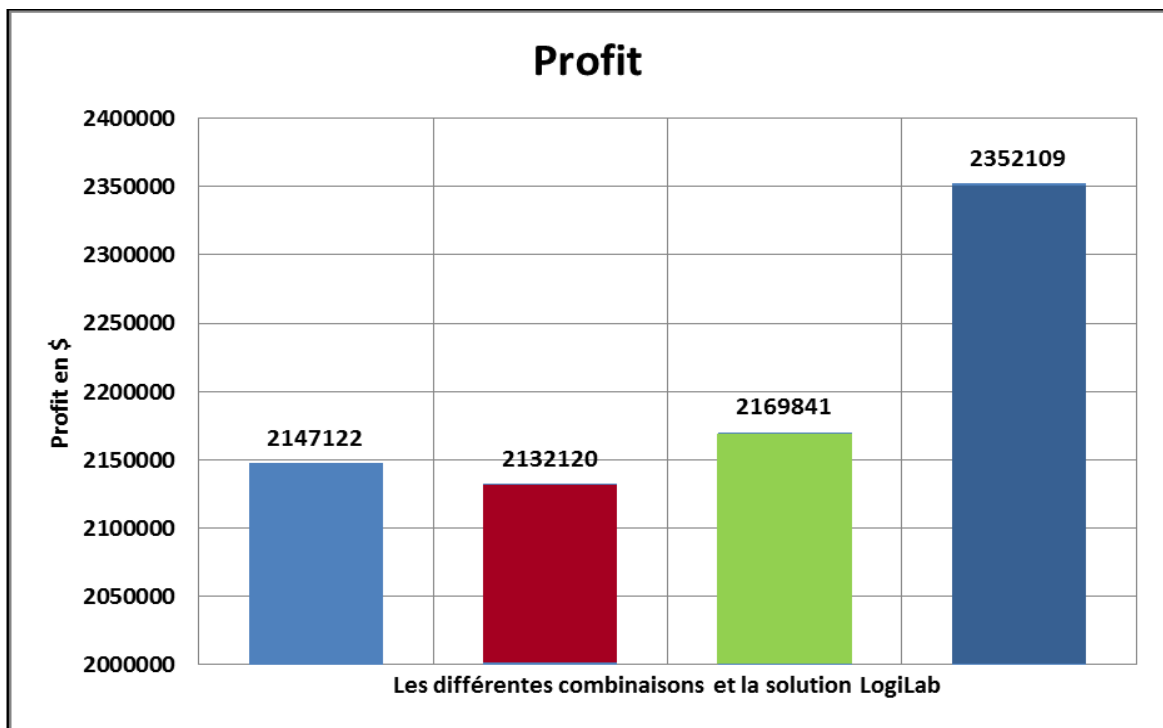


Figure 18. L'état en temps réel des stocks, de l'utilisation des processus et les quantités transférées entre les différentes scieries.

(b) *Étape 7 : Analyse*

Enfin, les résultats de simulation doivent être analysés par le décideur (étape 7). Les résultats sont fournis pour les différents ensembles de politiques. Le décideur a accès à un plus large éventail d'indicateurs que ceux obtenus à partir de l'optimisation au niveau tactique (par exemple la moyenne du niveau de stock au fil du temps, etc.). En se basant sur cette analyse, le décideur peut suggérer des changements aux politiques d'exécution et la politique de production-distribution et les évaluer à nouveau.

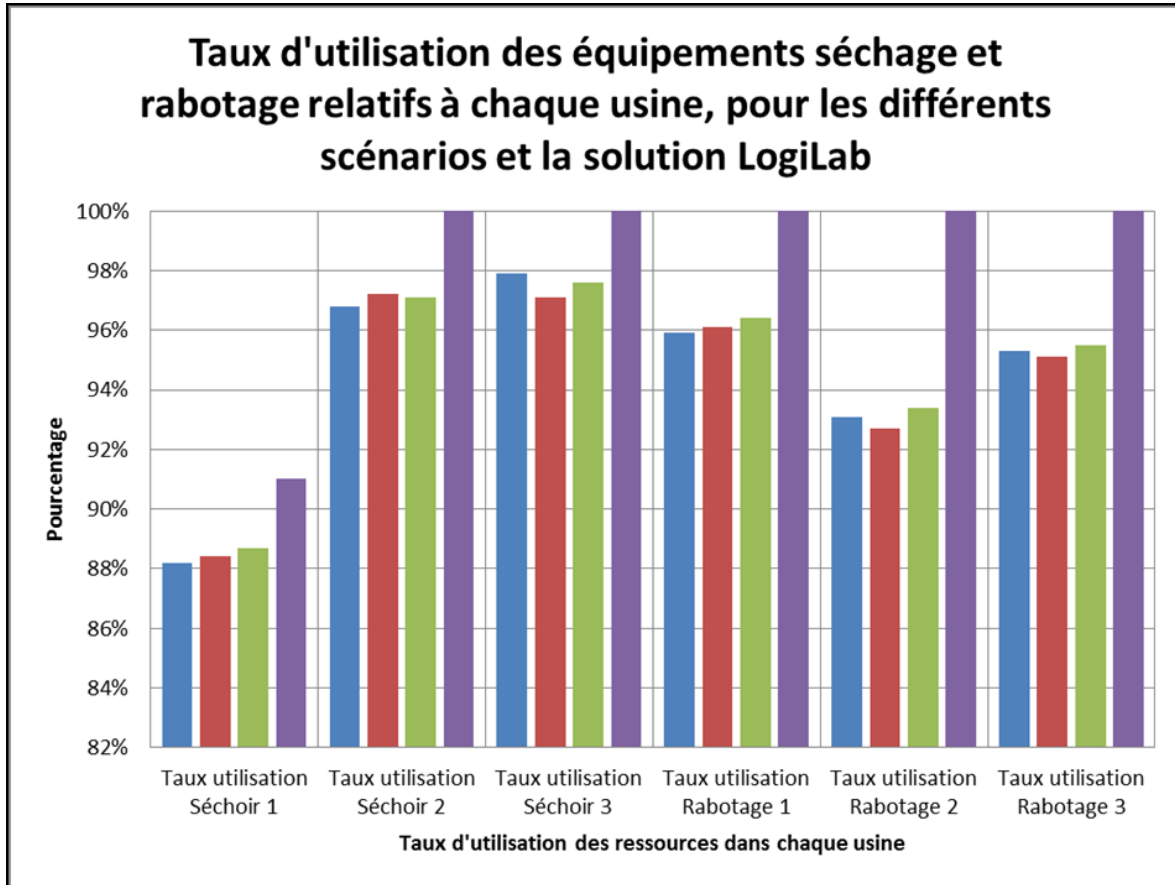
La Figure 19 et la Figure 20 représentent une comparaison des résultats de la simulation et de la solution originale de LogiLab.



- **Combinaison 1:** un produit par camion vers une seule destination
- **Combinaison 2:** un produit par camion vers plusieurs destination
- **Combinaison 3:** Plusieurs produits par camion vers une seule destination
- **LogiLab**

Figure 19. Comparaison du profit total des combinaisons et de la solution LogiLab.

D'après la Figure 19, on peut conclure que le profit obtenu par la solution LogiLab est plus grand que le profit obtenu par chaque combinaison de politiques de l'ordre de 8%. Ceci est dû au fait que LogiLab ne prenait pas compte des facteurs aléatoires, travaillait sur des données agrégées, et ignorait les politiques d'exécution. On remarque aussi, que la combinaison 3 a le meilleur profit par rapport aux autres combinaisons de politiques, donc, les décideurs devraient normalement choisir cette combinaison de politiques.



- **Combinaison 1:** un produit par camion vers une seule destination
- **Combinaison 2:** un produit par camion vers plusieurs destination
- **Combinaison 3:** Plusieurs produits par camion vers une seule destination
- **LogiLab**

Figure 20. Taux d'utilisation des équipements de chaque scierie de la simulation des différentes combinaisons et de la solution LogiLab.



La Figure 20 représente une comparaison entre les taux d'utilisation des équipements de chaque scierie obtenus par la simulation des différentes combinaisons et de la solution LogiLab. On remarque qu'il y a un écart entre les taux obtenus par simulation et celui obtenu par LogiLab. Ceci est dû aussi aux facteurs introduits par la simulation (politiques d'exécution, etc.) et la désagrégation du niveau tactique en fonction des différentes opérations (opérations des scieries, transport, etc.). Il serait cependant intéressant, dans des travaux futurs, de prendre en considération pour un cas réel les différents aspects aléatoires (ex. pannes machines, disponibilité des camions, etc.) et d'imaginer un mécanisme de rétroaction entre la simulation et l'optimisation, de manière à ce que l'optimisation soit en mesure de générer des politiques susceptibles d'être exécutées au niveau opérationnel avec le moins de déviations possible.



## Conclusion

La raison d'être de ce mémoire était la recherche d'une méthode qui permettrait la définition puis l'exécution d'un plan tactique dans le fonctionnement au jour le jour d'un réseau de production-distribution de produits forestiers. Pour ce faire, nous avons proposé un cadre intégrant l'optimisation et la simulation qui nous a permis d'élaborer et d'évaluer les politiques de pilotage de notre réseau.

Ce cadre comprend deux phases : la première phase (optimisation agrégée au niveau tactique) est supportée par le logiciel Logilab qui permet la schématisation de la chaîne logistique et l'élaboration du plan tactique de production-distribution. A ce stade, nous avons proposé une méthode concrète pour extraire automatiquement des politiques de production-distribution du plan tactique et proposé un mécanisme permettant d'exécuter la politique tactique au niveau opérationnel. Nous avons également établi que certaines politiques (appelées politiques d'exécution) ne peuvent être extraites du plan tactique. Elles doivent donc être formulées explicitement par le décideur.

La deuxième phase du cadre (anticipation du niveau opérationnel/exécution) est supportée par un modèle de simulation à événements discrets. On évalue chaque combinaison valide de politiques à l'aide de la simulation. Cette dernière représente une anticipation du fonctionnement réel du réseau et permet d'évaluer la performance attendue.

Afin de démontrer l'applicabilité du cadre, nous avons ensuite proposé une preuve de concept un cas numérique inspiré d'un réseau réel. Même s'il n'y avait pas de stochasticité dans notre simulation, on est parvenu à montrer que la désagrégation des politiques introduite dans la simulation avait une influence considérable sur la performance obtenue. On peut, cependant, s'attendre à ce qu'on s'écarte encore davantage de la solution du modèle tactique en contexte de stochasticité.

Rappelons que l'objectif de notre travail ne consistait pas à proposer une combinaison de politiques optimale pour un cas industriel bien précis, mais plutôt de montrer comment on peut sélectionner les politiques, diriger la production et le transport journalier dans un réseau à partir de ces politiques et de mieux anticiper l'impact de la politique de

production-distribution lorsqu'elle est combinée à des politiques d'exécution. Pourquoi serait-il nécessaire d'effectuer une optimisation au niveau tactique si une évaluation plus précise peut être faite en utilisant le modèle de simulation?

La réponse est qu'il existe un nombre infini de politiques de production-distribution, il ne serait pas possible de les évaluer à l'aide du modèle de simulation détaillé. Cependant l'optimisation au niveau tactique permet d'identifier soigneusement les politiques qui doivent être étudiées à l'aide du modèle de simulation. La simulation, montre également comment mettre en œuvre les décisions du niveau tactique au niveau opérationnel qui représente le monde réel. Il est à noter, que ce cadre peut être applicable à tout réseau de création de valeur qui fonctionne en flux poussés, puisqu'il prend en considération les processus convergent et divergent.

En ce qui concerne les travaux futurs, nous suggérons d'étendre le cadre afin d'étudier et soutenir l'intégration tactique/opérationnel dans un système de production en flux tirés, où les opérations sont planifiées/ordonnées en fonction des commandes des clients. Dans ce cas, le choix des méthodes de planification/ordonnement à utiliser au niveau opérationnel deviendrait une nouvelle politique à établir par le décideur au niveau tactique. La simulation du niveau opérationnel devrait donc inclure l'utilisation des modèles de planification opérationnelle prescrits par le niveau tactique. Le cadre deviendrait ainsi beaucoup plus générique.

## Bibliographie

- [1] *Forest products association of Canada. Disponible en ligne:* <http://www.fpac.ca/> (Consulté en janvier 2012).
- [2] *Le secteur forestier canadien: passé, présent, futur. Disponible en ligne* :<http://www.parl.gc.ca/> (Consulté en décembre 2012).
- [3] L. Benoit, "Canada's forest industry: recognizing the challenges and opportunities," *Rep. of the Standing Committee on Natural Resources, House of Commons, Canada*, 2008.
- [4] D. Carlsson and M. Rönnqvist, "Supply chain management in forestry—case studies at Södra Cell AB," *European Journal of Operational Research*, vol. 163, pp. 589-616, 2005.
- [5] D. Simchi-Levi, *Designing And Managing The Supply Chain: Concepts, Strategies And Case Studies*: McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2006, 498 p.
- [6] J. Gaudreault, "Algorithmes pour la prise de décision distribuée en contexte hiérarchique," École Polytechnique de Montréal, 2009.
- [7] J. Li, W. Li, and Y. Lin, "Port Supply Chain Simulation Model under Interactive Analysis," *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 2082-2086, 2011.
- [8] R. H. Ballou, *Business Logistics Management: Supply Chain Management. Planning, Organizing, and Controlling the Supply Chain*: Prentice-Hall Internat., 2004, 789 p.
- [9] H. Meyr, M. Wagner, and J. Rohde, "Structure of advanced planning systems," in *Supply chain management and advanced planning: concepts, models, software, and case studies*, H. Stadtler and C. Kilger, Eds., ed: springer, 2008, pp. 109-114.
- [10] S. Axsäter and H. Jönsson, "Aggregation and disaggregation in hierarchical production planning," *European Journal of Operational Research*, vol. 17, pp. 338-350, 1984.
- [11] H. Stadtler, "Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges," *European journal of operational research*, vol. 163, pp. 575-588, 2005.
- [12] F. Glineur, J. Teghem, and D. Tuytens, *Programmation linéaire*: Ellipses Marketing, 2003, 379 p.
- [13] J. Banks, *Discrete-event System Simulation*: Prentice Hall, 2010, 622 p.
- [14] J. Banks, *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*: Wiley, 1998, 849 p.
- [15] C. Damiron and A. Nastasi, "Discrete rate simulation using linear programming," in *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation*, 2008, pp. 740-749.
- [16] P. Harstela, "Decision support systems in wood procurement. A review," 1997.
- [17] Y. H. Lee and S. H. Kim, "Optimal production-distribution planning in supply chain management using a hybrid simulation-analytic approach," in *Proceedings of the 32nd conference on Winter simulation*, 2000, pp. 1252-1259.
- [18] G. Mendoza, R. Meimban, W. Luppold, and P. A. Araman, "Combining simulation and optimization models for hardwood lumber production," in *Proceedings: The 1991 SAP National Convention*, 1991, pp. 4-7.

- [19] S. D'Amours, M. Rönnqvist, and A. Weintraub, "Using operational research for supply chain planning in the forest products industry," *INFOR: Information Systems and Operational Research*, vol. 46, pp. 265-281, 2008.
- [20] E. Y. Haartveit, R. A. Kozak, and T. C. Maness, "Supply chain management mapping for the forest products industry: Three cases from western Canada," *Journal of Forest Products Business Research Volume*, vol. 1, p. 1, 2004.
- [21] J. Frayret, K. Boston, S. D'Amours, and L. Lebel, "The enabled supply chain—opportunities and challenges for forest business," *Journal of Forest Products Business Research*, 2005.
- [22] C. J. Vidal and M. Goetschalckx, "Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models," *European Journal of Operational Research*, vol. 98, pp. 1-18, 1997.
- [23] D. Vila, A. Martel, and R. Beauregard, "Designing logistics networks in divergent process industries: A methodology and its application to the lumber industry," *International Journal of Production Economics*, vol. 102, pp. 358-378, 2006.
- [24] D. Vila, R. Beauregard, and A. Martel, "The strategic design of forest industry supply chains," *INFOR: Information Systems and Operational Research*, vol. 47, pp. 185-202, 2009.
- [25] H. Gunnarsson, M. Rönnqvist, and D. Carlsson, "Integrated production and distribution planning for Södra Cell AB," *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, vol. 6, pp. 25-45, 2007.
- [26] T. C. Maness and D. M. Adams, "The combined optimization of log bucking and sawing strategies," *Wood and Fiber Science*, vol. 23, pp. 296-314, 1991.
- [27] T. C. Maness and S. E. Norton, "Multiple period combined optimization approach to forest production planning," *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 17, pp. 460-471, 2002.
- [28] M. Singer and P. Donoso, "Internal supply chain management in the Chilean sawmill industry," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 27, pp. 524-541, 2007.
- [29] M. Ouhimmou, S. D'Amours, R. Beauregard, D. Ait-Kadi, and S. S. Chauhan, "Furniture supply chain tactical planning optimization using a time decomposition approach," *European Journal of Operational Research*, vol. 189, pp. 952-970, 2008.
- [30] R. R. Farrell and T. C. Maness, "A relational database approach to a linear programming-based decision support system for production planning in secondary wood product manufacturing," *Decision Support Systems*, vol. 40, pp. 183-196, 2005.
- [31] D. Beaudoin, J.-M. Frayret, and L. LeBel, "Hierarchical forest management with anticipation: an application to tactical-operational planning integration," *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 38, pp. 2198-2211, 2008.
- [32] C. Schneeweiss, *Distributed Decision Making*: Springer, 2003, 528 p.
- [33] J. Gaudreault, P. Forget, J.-M. Frayret, A. Rousseau, S. Lemieux, and S. D'Amours, "Distributed operations planning in the softwood lumber supply chain: Models and coordination," *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice*, vol. 17, pp. 168-189, 2010.
- [34] P. Chandra and M. L. Fisher, "Coordination of production and distribution planning," *European Journal of Operational Research*, vol. 72, pp. 503-517, 1994.

- [35] W. Jerbi, J. Gaudreault, S. D'Amours, M. Nourelfath, S. Lemieux, P. Marier, *et al.*, "Optimization/simulation-based framework for the evaluation of supply chain management policies in the forest product industry," in *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 1742-1748.
- [36] W. D. Kelton, J. S. Smith, and D. T. Sturrock, *Simio & simulation: Modeling, analysis, applications*: Learning Solutions, 2011, 416 p.





## Annexe : Modèle mathématique sous LogiLab

### Ensembles

$E$  : L'ensemble des liens existant entre les unités

$K$  : L'ensemble des types de capacité (capacité machine, limite des stocks)

$P$  : L'ensemble des produits

$T$  : Nombre des périodes de temps

$U$  : L'ensemble des unités d'affaires

$W$  : L'ensemble des processus (machines, inventaires)

$W_{tu} \subset W$  : L'ensemble des processus pouvant être effectués à l'unité  $u$  à la période  $t$

$\delta_u^+ \subset E$  : L'ensemble des liens arrivant à  $u$

$\delta_u^- \subset E$  : L'ensemble des liens partant de  $u$

### Paramètres

$q_{ku}$  : Capacité de type  $k \in K$  de l'unité  $u$  au temps  $t$  disponible

$f_{etp}^l$  : Flux minimal du produit  $p$  passant par l'arc  $e$  à la période  $t$

$f_{etp}^u$  : Flux maximal du produit  $p$  passant par l'arc  $e$  à la période  $t$

$f_{et}^u$  : Flux maximal de tous les produits passant sur l'arc  $e$  à la période  $t$

$c_w$  : Coût du procédé  $w$

$c_{etp}^f$  : Coût de transport du produit  $p$  sur l'arc  $e$  si le transport commence à la période  $t$

$l_{etp}$  : Délai de transport du produit  $p$  sur l'arc  $e$  si le transport commence à la période  $t$

$s_w$  : Délai de production du produit  $p$  avec le procédé  $w$

$\alpha_{pw}$  : Quantité de produit  $p$  requis par le procédé  $w$

$\gamma_{pw}$  : Quantité de produit  $p$  produit par le procédé  $w$

$\lambda_{kuw}$  : Quantité d'unités de capacité de type  $k \in K$  de l'unité  $u$  consommé par le procédé  $w$

$d_{tup}$  : Demande de produit  $p$  à l'unité  $u$  à la période  $t$

$\rho_{tup}$  : Valeur de vente du produit  $p$  à l'unité  $u$  à la période  $t$

$\beta_{tup}$  : Approvisionnement externe de produit  $p$  à l'unité  $u$  à la période  $t$

$\sigma_t$  : Le facteur de réduction à la période t

### Variables de décisions

$Y_{tuw}$  : La quantité du procédé w effectuée à l'unité u et se terminant à la période t

$D_{tup}$  : La quantité de produit p vendue à l'unité u à la période t

$F_{ept}$  : Le flux de produit p sur l'arc e à la période t

### Fonction-objectif

L'objectif pour la chaîne de création de valeur des produits forestiers est de maximiser le profit total, qui est la différence entre les revenus de ventes et la somme des coûts de production, d'approvisionnement, de stockage et de transport entre les différentes unités d'affaires et vers les clients.

*Maximiser*

$$\sum_{t \in T} \sigma_t \left( \sum_{u \in U} \left( \sum_{p \in P | d_{tup} > 0} \rho_{tup} D_{tup} - \sum_{w \in W_u} c_w Y_{tuw} \right) - \sum_{e \in E} \left( \sum_{p \in P} c_{etp}^f F_{etp} \right) \right) \quad (1)$$

*Contraintes*

$$\beta_{tup} + \sum_{t_1 \in T} \left( \sum_{w \in W_{tu} | t_1 + s_w = t} \gamma_{pw} Y_{t_1up} \right) + \sum_{e \in \delta_u^+} \left( \sum_{t_2 \in T | t_2 + l_{et_2p} = t} F_{et_2p} \right) - \quad (2)$$

$$\sum_{w \in W_u} \alpha_{pw} Y_{tuw} - \sum_{e \in \delta_u^-} F_{etp} - D_{tup} = 0 \quad \forall t \in T, u \in U, p \in P.$$

$$\sum_{w \in W_u} \lambda_{kuw} Y_{tuw} \leq q_{ktu} \quad \forall t \in T, u \in U, k \in K. \quad (3)$$

$$D_{tup} \leq d_{tup} \quad \forall t \in T, u \in U, p \in P. \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} F_{etp} \leq f_{et}^u \quad \forall t \in T, e \in E. \quad (5)$$

$$f_{etp}^l \leq F_{etp} \leq f_{etp}^u \quad \forall e \in E, t \in T, p \in P. \quad (6)$$

$$D, F, Y \geq 0. \quad (7)$$