

SÉBASTIEN LEMIEUX

**Simulateur multiagent d'un réseau de création de  
valeur : application à l'industrie forestière**

Mémoire présenté  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de maîtrise en génie mécanique  
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2010

©Sébastien Lemieux, 2010

# Résumé

Les décisions de planification à l'intérieur d'un réseau de création de valeur sont multiples et peuvent entraîner de lourdes conséquences pour une entreprise. Différents outils sont disponibles pour aider les personnes en charge de prendre ces décisions en offrant un suivi sur la production, le transport, les inventaires, etc.

Ce mémoire propose la conception d'un simulateur basé sur une plateforme de planification multiagent déjà existante. Pour se faire, différents mécanismes de simulation devront être implantés, principalement la gestion du temps. De plus, un nouvel agent a été développé afin de simuler le rôle de clients dans un réseau de création de valeur de bois d'œuvre. De plus, cet agent permet de simuler les deux types de relation d'affaires qui sont les plus courantes dans cette industrie. La dernière contribution est la conception d'un cas d'étude pour démontrer les capacités de ce simulateur à travers différentes expérimentations.

# Abstract

Planning decisions within a value creation network are multiple and may have strong impacts on the future of a company. By providing monitoring of production, transportation, inventories, etc., various tools are available to help decision makers.

This thesis proposes the design of a simulator based on an existing multiagent planning platform. To do so, different simulation mechanisms were implemented, most of them related to time management. In addition, a new agent was developed to simulate the role of customers in a lumber value creation network. Furthermore, this agent can simulate the two most common types of business relationships in the industry. The latest contribution is the design of a case study that demonstrates the capabilities of this simulator through various experiments.

# Avant-propos

Ce mémoire représente les travaux effectués pour l'obtention de mon diplôme de maîtrise sous la supervision de Sophie D'Amours et de Jean-Marc Frayret. Il est composé principalement de deux articles où j'ai été le chercheur principal. J'ai réalisé la programmation informatique des modules nécessaires pour la simulation. De plus, j'ai effectué la conception, la calibration et l'analyse du cas d'étude présenté dans ces travaux. Également, j'ai rédigé la première version des deux articles qui sont présentés dans ce mémoire. Sophie D'Amours, Jean-Marc Frayret et Jonathan Gaudreault ont participé à la révision des articles afin d'obtenir les versions finales.

Le premier article intitulé «Intégration d'outils APS dans une simulation multi-agent : Une application à l'industrie du bois d'oeuvre», co-écrit avec Sophie D'Amours, Jonathan Gaudreault et Jean-Marc Frayret, a été présenté à la 7<sup>ième</sup> Conférence Internationale de Modélisation et Simulation qui a eu lieu à Paris en France du 31 mars au 2 avril 2008. Le contenu de la version dans le mémoire est identique à la version acceptée sauf pour quelques corrections mineures.

L'essentiel de cet article consiste à présenter mes travaux sur la conception d'un simulateur à base d'agent. Une expérimentation est présentée afin d'analyser le volume de contrat qu'une usine peut accepter pour augmenter son revenu en utilisant une approche de planification axée sur la demande. À cette fin, des pénalités sont imposées lorsque les livraisons s'effectuent en retard. Cette analyse utilise un horizon très court pour tirer des résultats. Le cas d'étude utilisé a été développé de façon à représenter une entreprise de bois d'oeuvre de l'est du Canada qui est composée d'un complexe de sciage, un de séchage et de finition (rabotage et emballage).

Suite aux résultats de ce premier article, plusieurs commentaires de personnes de l'industrie forestière m'ont permis de mieux saisir le contexte d'affaires dans lesquelles celles-ci évoluent. Ce second article intitulé «Agent-based simulation to anticipate impacts of tactical supply chain decision-making in the lumber industry», co-écrit avec Sophie D'Amours, Jonathan Gaudreault et Jean-Marc Frayret, a été soumis à la revue

Engineering Applications of Artificial Intelligence en août 2009. Le contenu de la version dans le mémoire est identique à la version soumise sauf pour quelques corrections mineures.

Bien qu'essentiellement basé sur le même outil, cet article va plus loin avec une meilleure connaissance du problème, un outil beaucoup plus perfectionné, une plus grande capacité de simulation ainsi que les commentaires d'industriels sur le premier article. Principalement, l'expérimentation utilise le concept d'horizon roulant ce qui permet de mieux représenter la réalité. De plus, au lieu d'utiliser un seul indicateur de performance, trois sont utilisés afin de mesurer la performance, aussi bien du côté du manufacturier que du client. L'idée dans cette expérimentation est de mesurer l'impact de l'implémentation de différentes stratégies de planification. Le cas d'étude utilisé est le même que dans l'article précédent mais il inclut plusieurs améliorations.

*À ma mère qui est un exemple de courage et de  
persévérance  
Aux personnes qui m'entourent et qui m'ont soutenu  
dans ce projet*

# Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iii
Avant-propos	iv
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xi
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 L'industrie forestière au Québec . . . . .	1
1.2 Plateforme expérimentale de planification . . . . .	2
1.3 La simulation, un domaine en évolution . . . . .	2
1.3.1 Simulateur multiagent . . . . .	3
<b>2 Revue de littérature</b>	<b>5</b>
2.1 Réseau de création de valeur . . . . .	5
2.2 Relations client-fournisseur . . . . .	6
2.2.1 Client spot . . . . .	6
2.2.2 Client contractuel . . . . .	7
2.3 Outils APS . . . . .	7
2.3.1 Systèmes APS multiagents . . . . .	8
2.4 Simulation . . . . .	10
2.4.1 Probabilités . . . . .	11
2.4.2 Variables aléatoires . . . . .	11
2.4.3 Génération de nombres aléatoires . . . . .	19
2.4.4 Simulation à événement discret . . . . .	22
2.4.5 Validation et vérification d'une simulation . . . . .	26
2.4.6 Simulateur à base d'agents . . . . .	29
<b>3 Conception d'un cas virtuel</b>	<b>31</b>
3.1 Plan d'expérience . . . . .	31

3.1.1	Définition des besoins . . . . .	31
3.1.2	Configuration de la simulation . . . . .	33
3.2	Évaluation de la situation actuelle . . . . .	33
3.3	Modélisation et équilibrage d'une scierie . . . . .	35
3.4	Caractérisation des clients . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Simulation multi-agent dans l'industrie forestière</b>	<b>40</b>
4.1	Résumé . . . . .	40
4.2	Intégration d'outils APS dans une simulation multiagent : Une application à l'industrie du bois d'oeuvre . . . . .	41
4.2.1	Introduction . . . . .	41
4.2.2	Virtual Lumber Case . . . . .	42
4.2.3	Simulateur . . . . .	52
4.2.4	Expérimentation . . . . .	56
4.2.5	Conclusion . . . . .	58
<b>5</b>	<b>Décisions tactiques influencées par la simulation multiagent</b>	<b>61</b>
5.1	Résumé . . . . .	61
5.2	Agent-based simulation to anticipate impacts of tactical supply chain decision-making in the lumber industry . . . . .	62
5.2.1	Introduction . . . . .	62
5.2.2	Virtual Lumber Case . . . . .	64
5.2.3	Simulation Components . . . . .	79
5.2.4	Experiment . . . . .	89
5.2.5	Results . . . . .	92
5.2.6	Concluding Remarks . . . . .	94
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>98</b>
6.1	Contributions . . . . .	98
6.1.1	Simulateur avec un APS . . . . .	98
6.1.2	Virtual Lumber Case . . . . .	99
6.2	Projets futurs . . . . .	99
6.3	Conclusion finale . . . . .	100
	<b>Bibliographie</b>	<b>101</b>
<b>A</b>	<b>Virtual Lumber Case en détail</b>	<b>104</b>
A.1	Produits dans le réseau de création de valeur . . . . .	104
A.1.1	Billes . . . . .	105
A.1.2	Produits sciés . . . . .	105
A.1.3	Produits séchés . . . . .	105
A.1.4	Produits finis . . . . .	106

A.2	Processus . . . . .	108
A.3	Les clients . . . . .	110
A.3.1	Client spot . . . . .	112
A.3.2	Client contractuel . . . . .	113

# Liste des tableaux

1.1	Pertes dans l'industrie forestière entre avril 2005 et juin 2009 . . . . .	2
2.1	Quelques fonctions de densité . . . . .	14
2.2	Tendances de l'analyse résiduelle . . . . .	17
2.3	Comparatif des algorithmes de génération . . . . .	21
3.1	Description des différentes expérimentations . . . . .	34
3.2	Calendrier des opérations . . . . .	36
3.3	Répartition de la demande selon le profil des planches . . . . .	37
3.4	Répartition de la demande selon la longueur des planches . . . . .	38
3.5	Répartition de la demande selon la classe qualité des planches . . . . .	38
4.1	Différences des problèmes des unités de sciage, de séchage et de finition .	47
4.2	Configuration des unités de sciage, de séchage, de finition et de ventes .	48
5.1	Definition of sawing, drying, finishing and deliver units . . . . .	72
5.2	Definition of sawing, drying and finishing algorithms . . . . .	73
5.3	Example of a sawing process . . . . .	75
5.4	Example of a drying process . . . . .	77
5.5	Example of a finishing process . . . . .	78
5.6	Experiments summary . . . . .	92
A.1	Billes provenant de la forêt . . . . .	105
A.2	Produits en sortie du sciage . . . . .	106
A.3	Produits en sortie du séchage . . . . .	107
A.4	Produits en sortie du réseau de création de valeur . . . . .	108
A.5	Définition du type de processus . . . . .	109
A.6	Volumes consommés d'un processus . . . . .	111
A.7	Volumes produits d'un processus . . . . .	111
A.8	Temps d'occupation des machines par processus . . . . .	112
A.9	Fonctions de distribution implantées . . . . .	112
A.10	Paramétrage des fonctions de distribution . . . . .	112

# Table des figures

2.1	Modules logiciels pour la planification d'une chaîne d'approvisionnement	9
2.2	Plateforme Expérimentale de Planification FORAC	9
2.3	Exemple de quatre intervalles sur une courbe normale	23
2.4	Modèle d'un simulateur centralisé et distribué	24
2.5	Modèle d'un simulateur décentralisé	25
2.6	Impact du pas de simulation	25
4.1	Composition du simulateur	43
4.2	Protocole pour connaître le niveau d'inventaire d'un produit d'un agent	45
4.3	Agents de la plateforme expérimentale FORAC	45
4.4	Exemple de discrétisation d'une distribution normale	50
4.5	Algorithme de génération de demandes spot	51
4.6	Algorithme de génération de demandes contrat	53
4.7	Comportement lors d'une simulation du client spot	55
4.8	Comportement lors d'une simulation du client contrat	57
4.9	Revenu mensuel selon le pourcentage de client contractuel (résultats prélim.)	59
5.1	Conceptual simulator composition	65
5.2	Generic overview of the FEPP	67
5.3	Example of a workflow	68
5.4	Example of a protocol during a conversation between two agents	70
5.5	A configuration of the FEPP	71
5.6	Example of a sawing decision	75
5.7	Example of possible loading patterns	76
5.8	Example of possible outputs for a rough lumber	76
5.9	Example of a normal curve	84
5.10	Spot demands generation algorithm	85
5.11	Contract demands generation algorithm	87
5.12	Behaviour of Spot Customer in a simulation	88
5.13	Behaviour of Contract Customer in a simulation	90
5.14	Experiments Results	94

# Chapitre 1

## Introduction

De nos jours, les systèmes d'informations sont nécessaires à la gestion des entreprises. Ces systèmes permettent de faire le suivi des inventaires, des commandes, de la production, du transport, etc. Ils offrent la possibilité de traiter cette immense quantité de données et résumer l'information dans un format compréhensible par l'utilisateur. Le parcours difficile de l'industrie forestière des dernières années demande une réingénierie des processus de planification tel que des systèmes d'information évolués. L'utilisation de la simulation peut également offrir un avantage compétitif à cette industrie en permettant de mieux comprendre la dynamique des processus de planification.

L'objectif de ces travaux est de comprendre la réalité de l'industrie forestière québécoise et d'inclure ces connaissances dans le développement d'un simulateur à base d'agents. Le simulateur développé servira ensuite à effectuer des expérimentations pour mesurer l'impact de l'implémentation de stratégies de planification dans une entreprise de bois d'œuvre.

### 1.1 L'industrie forestière au Québec

Au cours des dernières années, l'industrie forestière a été particulièrement malmenée à plusieurs niveaux. La perception des Québécois envers cette industrie ne s'est pas améliorée<sup>1</sup>, la diminution des volumes de coupe suite au rapport Coulombe, la montée rapide du dollar canadien face à celui du principal importateur ainsi que la crise finan-

---

<sup>1</sup>Voir Mémoire intérimaire du CIFQ sur le livre vert du gouvernement du Québec à l'adresse [http://www.cifq.qc.ca/imports/\\_uploaded/file/memoire-CIFQ-livre-vert.pdf](http://www.cifq.qc.ca/imports/_uploaded/file/memoire-CIFQ-livre-vert.pdf) (consulté le 2008-12-01)

cière actuelle ont fait en sorte que plusieurs entreprises ont dû fermer temporairement ou de façon permanente des usines (voir tableau 1.1). Il est à noter qu'au 1<sup>er</sup> avril 2005, 104 400 emplois étaient en lien avec l'industrie forestière au Québec. La conséquence de tous ces changements est que l'industrie traverse présentement une période de crise et doit trouver des solutions afin de se remettre sur pied.

	Permanents	Temporaires	Total
Usines fermées	125	102	227
Emplois perdus	9825	7214	17039

TAB. 1.1: Pertes dans l'industrie forestière entre avril 2005 et juin 2009<sup>2</sup>

Pour pouvoir se relever, elle doit travailler en partenariat avec des centres de recherche dont le consortium de recherche FORAC<sup>3</sup> pour trouver des nouvelles stratégies de gestion, de vente, de planification ou toutes autres améliorations possibles.

## 1.2 Plateforme expérimentale de planification

Depuis quelques années, FORAC s'intéresse au réseau de création de valeur dans l'industrie forestière. Cet intérêt a donné naissance à une plateforme expérimentale de planification qui permet de planifier les opérations d'une scierie dans un niveau de détails jamais atteint jusqu'à présent.

Cette plateforme (qui sera référée par l'acronyme PEFP pour plateforme expérimentale FORAC de planification dans le reste du document), constituée à base d'agent, permet de façon pratique et flexible, d'être configurée de manière à représenter n'importe quelle scierie de résineux afin d'en faire la planification quotidienne. Le résultat de cette planification est un plan au niveau opérationnel pour chaque unité d'affaires, à savoir quelles seront les opérations que réaliseront les employés à chaque journée.

<sup>2</sup>Voir le document intitulé «Portrait de l'emploi dans l'industrie forestière québécoise» sur le site du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec à <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/pertes-emplois-2009-06.pdf> (consulté le 2009-06-30)

<sup>3</sup><http://www.forac.ulaval.ca>

### 1.3 La simulation, un domaine en évolution

Un autre domaine d'où pourrait éclore des solutions pour cette industrie est la simulation. La simulation est une façon de modéliser un phénomène, réel ou hypothétique, et de le faire évoluer dans un environnement virtuel tout en contrôlant les paramètres qui interagissent avec ce modèle.

La place qu'occupe la simulation dans la recherche et le développement n'est pas en voie de disparaître. Au contraire, cette place prend de plus en plus d'importance au fil des années. Les nouvelles pièces automobiles sont les sur informatique pour être testées sur des bancs d'essais virtuels. Certains chercheurs utilisent la simulation pour prévoir les effets d'un scénario catastrophe tel qu'une collision d'un météorite avec la Terre. D'autres tentent de prévoir la météo à long terme avec des modèles très complexes nécessitant une immense quantité de calculs distribués sur un réseau composé de plusieurs ordinateurs.

Les entreprises commencent utiliser la simulation de leurs flux de matière, leurs inventaires, leurs procédés, etc. L'objectif étant de mieux comprendre l'entreprise en elle-même mais également de pouvoir mesurer l'impact de différentes stratégies de planification en utilisant la simulation. Cette méthode de travail permettra d'effectuer des tests sans avoir à perturber le fonctionnement quotidien de ces entreprises.

Mais pour que ces études soient vraiment crédibles, il faut être en mesure de modéliser au-delà de son propre réseau interne, à savoir ses fournisseurs et ses clients. Pourquoi devons-nous modéliser des clients ainsi que des fournisseurs? Il serait tout à fait possible de faire des simulations en utilisant des données historiques des ventes par exemple. Cependant, il existe un problème à utiliser cette méthode. Très souvent, il y a eu un traitement de ces informations de ventes, qu'il soit intentionnel ou non. Par conséquent, ce traitement aura un impact sur les simulations et les constats qui en seront tirés.

Pour contrer ce problème, il est donc nécessaire d'avoir accès à différents profils de demande. Et la seule façon d'avoir des données potentiellement réelles de demandes est d'être en mesure de reproduire le comportement d'achat des clients en modélisant ses habitudes de consommation. À partir de cela, il devient possible de générer à volonté une quantité de scénarios où les demandes sont différentes de la réalité mais restent tout de même plausibles.

### 1.3.1 Simulateur multiagent

En combinant la PEPF avec des composantes de simulation, il est ainsi possible de l'utiliser comme simulateur. Les principales composantes ajoutées sont un mécanisme de synchronisation d'horloge pour que tous les agents travaillent en même temps et un agent émulant le comportement des clients. Mes travaux portent sur ces composantes et elles seront explicitées plus loin.

En premier lieu (chapitre 2), une revue de littérature sera faite pour présenter l'état de l'art dans les réseaux de création de valeur, les outils APS (*Advanced Planning and Scheduling*) ainsi que la simulation. Une sous-section est réservée pour un rappel de notions en statistique puisqu'elles font partie intégrante de la simulation.

Dans la section 3, il sera question de la conception d'un cas virtuel. Ce cas virtuel permettra d'effectuer des expérimentations et offrira la possibilité de publier les résultats associés ; les entreprises refusent souvent de publier des données qui leurs appartiennent.

Le chapitre 4 présente le premier des deux articles de ce mémoire. Les réalisations principales dépeintes dans cet article consistent à l'intégration d'outil APS dans une simulation multiagent et la conception d'un cas virtuel. Une expérimentation y est présentée de façon à démontrer le potentiel d'un tel simulateur.

La section suivante (chapitre 5) concerne le second article et discutera de la possibilité de prendre des décisions tactiques suite à une simulation multiagent. Cet article reprend le cas virtuel établi à la section précédente en vue d'analyser deux stratégies de planification dans un réseau de création de valeur dans l'industrie forestière.

Finalement, la dernière partie (chapitre 6) fera un retour sur les différentes contributions et énoncera les pistes futures à étudier.

# Chapitre 2

## Revue de littérature

Ce chapitre présente la revue de littérature sur la simulation des réseaux de création de valeur. Il est divisé en quelques parties de façon à séparer les différents modules nécessaires à l'obtention d'un simulateur de réseaux de création de valeur à base d'agent.

### 2.1 Réseau de création de valeur

Un réseau de création de valeur est constitué d'un groupe d'unités dont le but premier est d'offrir un service ou un produit tel que le mentionne Stadtler and Kilger (2005) :

[...] a supply chain consists of two or more legally separated organizations, being linked by material, information and financial flows. These organizations may be firms producing parts, components and end products, logistic service providers and even the (ultimate) customer himself.

Ainsi, à la différence d'une entreprise, un réseau de création de valeur comprend potentiellement des unités d'affaires d'entreprises différentes. Conséquemment, la collaboration entre les différentes parties du réseau est nécessaire afin d'optimiser les gains du réseau dans son ensemble. Nécessairement, pour qu'une entreprise joigne un réseau, il faut que ce soit une situation *gagnant-gagnant* ; chaque participant doit obtenir un gain de cette collaboration. Ce gain peut être négligeable au début pour améliorer la compétitivité du réseau mais doit être présent à long terme pour que ce participant conserve un intérêt.

## 2.2 Relations client-fournisseur

Il existe plusieurs façons pour un client de transiger l'information avec son fournisseur. Il est possible que ce soit en personne, par téléphone ou électroniquement. De plus, les clients n'ont pas toutes les mêmes «habitudes» pour commander des produits. Certains préféreront demander quelques temps à l'avance s'il existe des quantités disponibles pour un produit précis. D'autres, feront des ententes avec leurs fournisseurs pour des quantités à recevoir à intervalles réguliers.

### 2.2.1 Client spot

La caractéristique principale d'un client spot est sa variabilité. Ce type de client rend donc la planification d'un réseau de création de valeur complexe puisqu'il est difficile à prévoir le moment d'arrivé d'une demande ainsi que la quantité qui y est associée.

De plus, chaque demande proposée est souvent indépendante de celles déjà présentes et celles à venir. En effet, puisqu'il n'y a aucun engagement à long terme liant le fournisseur et le client, ce sont souvent des promesses unilatérales de vente traitées individuellement. Bien entendu, un refus systématique pour chaque demande risque de diminuer le nombre de demandes proposées par ce client puisqu'il sera plus enclin à aller voir un compétiteur.

Aussi, chaque demande peut être caractérisée par le délai entre le moment de la réception de la demande et la date à laquelle le produit doit être livré. Certains clients auront tendance à commander à la dernière minute alors que d'autres opteront pour une plus grande sécurité en plaçant leurs demandes très longtemps à l'avance.

Il est à noter que ce type de clients est influencé par la saisonnalité. Par exemple, la plupart des motoneiges sont vendues en début d'hiver. Il peut aussi être influencé par le prix. Dans le cadre de cet exemple, les détaillants de motoneiges sont en mesure de susciter un intérêt à la fin de la saison d'hiver en réduisant les prix. Il existe des cas où les prix varient avec le temps, comme c'est le cas avec les métaux où le prix change à chaque jour.

Les grossistes sont généralement considérés comme des clients spot ; ils achètent lorsque les prix du bois sont faibles pour les vendre lorsque les prix sont plus élevés.

### 2.2.2 Client contractuel

Le client contractuel, comme son nom l'indique, implique un contrat liant le client avec son fournisseur. Ce contrat peut impliquer plusieurs clauses, mais généralement les points principaux du contrat sont :

- la quantité qui sera commandée par période
- la prime sur le prix du produit
- la pénalité sur les retards
- les pénalités en cas de rupture du contrat

Ce type de client est généralement beaucoup plus stable par nature. Il est ainsi plus facile de prévoir les besoins de ce client. Par contre, ce dernier risque d'avoir des attentes plus élevées envers son fournisseur. Il est donc important de bâtir une relation de confiance afin de la faire durer longtemps. Les chaînes de magasin utilisent les contrats afin de stabiliser les approvisionnements.

## 2.3 Outils APS

Il existe une quantité importante d'outils commerciaux pour faire la planification (stratégique, tactique et/ou opérationnelle) et le suivi de la production d'un réseau de création de valeur. Cette discipline peut porter plusieurs noms mais dans le cadre de nos travaux, le terme de gestion de réseau de création de valeur (qui provient de la traduction de *Supply Chain Management*) sera retenue. La définition suivante provient de Stadtler (2005) :

Supply chain management (SCM) is the task of integrating materials, information and financial flow in order to fulfill (ultimate) customer demands with the aim of improving competitiveness of the SC (Supply Chain) as a whole.

Plusieurs moyens sont employés pour faire de la gestion de réseau de création de valeur. Il y a eu au début le crayon, le papier et la règle à calcul. Puis l'avènement de l'informatique a révolutionné cette façon de faire pour la remplacer par une quantité innombrable d'outils. Certaines entreprises utilisent des outils comme des tableurs pour faire la planification. D'autres utilisent des outils plus avancés et adaptés tel que des systèmes MRP (*Material requirements planning*) ou des systèmes ERP (*Enterprise Resource Planning*). La dernière mode est les systèmes APS (*Advanced Planning and Scheduling*).

Les systèmes APS sont des solutions logicielles qui intègrent différents modèles et algorithmes pour aider à la planification. Malgré le nombre de systèmes APS existants, il existe une architecture générale commune à tous ces systèmes (voir figure 2.1). L'objectif principal d'un système APS est la capacité de faire le suivi des matériaux dans tout le réseau de création de valeur et dans les différentes unités d'affaires : achats, production, distribution et ventes. Une description des différents modules est disponible dans Stadtler (2005).

### 2.3.1 Systèmes APS multiagents

Les systèmes APS plus traditionnels sont des systèmes centralisés et hiérarchique où l'information est concentrée à seul endroit. La planification se fait généralement avec l'aide d'outils tirés du domaine de la recherche opérationnelle (heuristiques, programmation mathématique, etc.).

Les systèmes APS multiagents, quant à eux, sont des systèmes distribués. Chaque composante (nommée agent) possède l'information nécessaire et peut représenter une unité d'affaires, un groupe d'unités ou une fonction de planification particulière. Il est également possible de représenter chaque ressource, opération et plage horaire par des agents plus simples qui doivent former des groupes afin de construire un plan. Il faut ajouter à tout cela une méthode pour faire circuler l'information d'un agent à l'autre. Un exemple de système APS multiagent est la Plateforme Expérimentale de Planification FORAC (PEPF). Une description plus approfondie se retrouve dans l'article de Frayret et al (2007) mais un survol s'avère nécessaire.

La plateforme est un groupe d'agents qui travaillent ensemble afin de concevoir des plans de production au niveau opérationnel pour un réseau de création de valeur dans le domaine du bois d'œuvre (voir figure 2.2). Les agents communiquent entre eux en propageant des plans d'approvisionnement et des plans de demande. Ces plans correspondent à une aggrégation de demandes (ou approvisionnements) destinées à un client (ou provenant d'un fournisseur) unique pour un produit spécifique. L'agent *Logistic*, pour sa part, gère le transport entre les différentes agents en ajoutant les délais en transport principalement et l'agent *Planning Unit* s'occupe de la gestion des messages entre les agents.

L'agent *Source* représente un département d'approvisionnement. Son travail consiste à recevoir des produits (d'un autre réseau ou de la forêt) et de les transmettre aux bons agents. L'agent *Deliver* est à l'autre bout de la chaîne. C'est celui qui permet de vendre les produits fabriqués dans la chaîne de production. Il possède deux rôles majeurs.

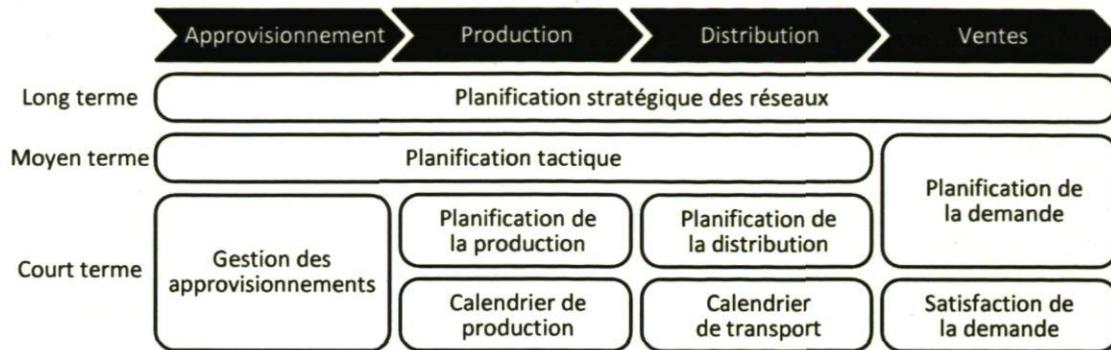


FIG. 2.1: Modules logiciels pour la planification d'une chaîne d'approvisionnement (Traduit de Meyr et al, 2002, p. 99)

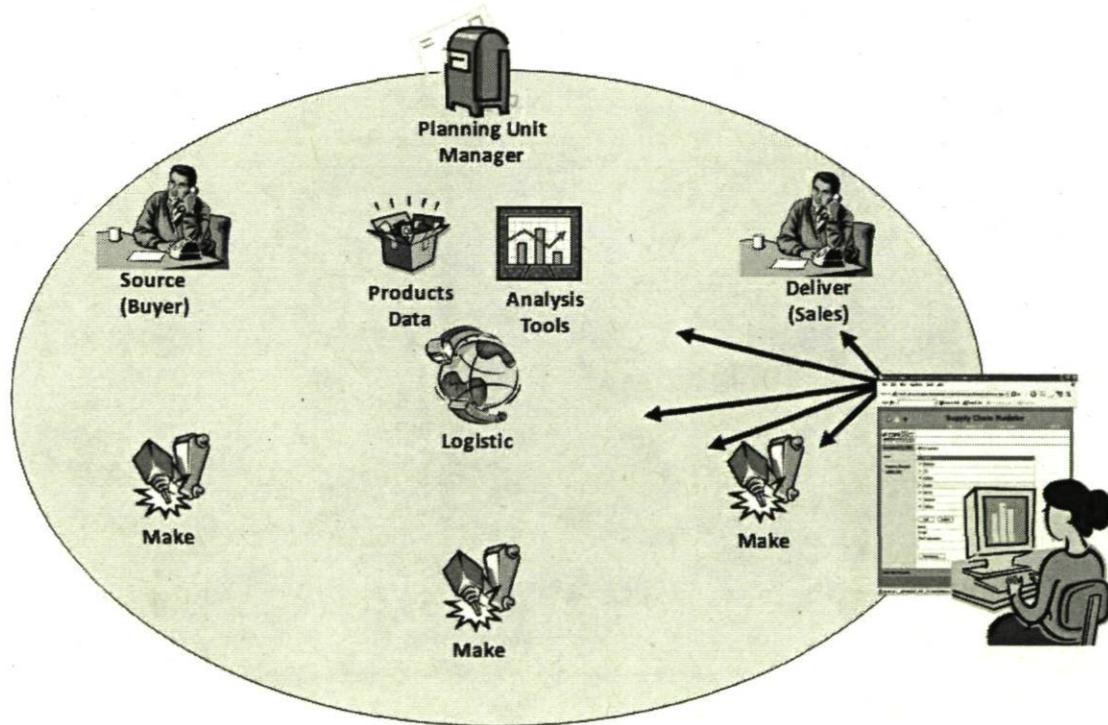


FIG. 2.2: Plateforme Expérimentale de Planification FORAC

Le premier est de propager les plans de demandes des clients aux bons destinataires. S'il est possible de fournir le produit à partir de plus d'une source, il partagera les demandes de façon à s'approcher d'un ratio déterminé à l'avance. Son deuxième rôle est d'effectuer l'allocation de l'approvisionnement vers les clients. Pour cela, il a recours à un algorithme de programmation linéaire.

Les agents *Sawing*, *Drying* et *Finishing* sont, quant à eux, très semblables dans leurs fonctions principales. Ils doivent tous propager leurs plans de demande à leurs prédécesseurs. De plus, ils prennent comme entrée les plans d'approvisionnement des fournisseurs et planifie pour transmettre leurs plans d'approvisionnement à leurs successeurs respectifs. C'est pourquoi ils sont considérés comme des agents *Make* (voir Stewart (1997) pour plus d'information sur le modèle SCOR). Il existe des différences entre les trois dû à leur rôle dans la chaîne. Les agents *Sawing* et *Finishing* modélisent des processus divergents. Pour un produit donné en entrée, le résultat sera deux (ou plus) produits en sortie. L'agent *Drying* quant à lui modélise un processus plusieurs à plusieurs. Les algorithmes dans chacun d'eux sont différents également. L'agent *Sawing* planifie en utilisant la programmation linéaire. L'agent *Drying* utilise la programmation par contrainte pour faire sa planification. Et finalement, l'agent *Finishing* a le choix entre deux méthodes : la programmation linéaire ou l'utilisation d'une heuristique.

## 2.4 Simulation

Les systèmes APS sont des systèmes très intéressants et utiles pour une entreprise. La planification est facilitée par ces outils ce qui permet d'augmenter la productivité. Mais il existera toujours une limite où l'amélioration n'est plus possible même avec les meilleurs systèmes ; la productivité de l'entreprise sera optimale.

Puisque les systèmes APS sont des systèmes où les données sont récentes, et parfois presque en temps réel, il est difficile de déroger de la réalité pour étudier un cas qui demande la modification et la création de nouvelles données. C'est pourquoi des modules de simulation ont été ajoutés aux systèmes APS. La simulation est formée de plusieurs composantes : les probabilités, la génération de nombres aléatoires, l'avancement du temps et la validation.

### 2.4.1 Probabilités

Les probabilités sont très répandues dans notre société. De nos jours, elles sont omniprésentes. Les prévisions météorologiques, les différents jeux d'argent (6/49, Super 7, casinos) et les assurances (les primes sont basées sur différentes probabilités fortes complexes) sont impossibles à dissocier des probabilités.

Dans cette section, il sera question des probabilités appliquées au domaine de la simulation. Pour ce faire, une révision des variables aléatoires, des fonctions de densités et de différentes méthodes de régression sera présentée.

### 2.4.2 Variables aléatoires

Une variable aléatoire peut ressembler à une variable dite plus classique, c'est-à-dire celle utilisée en algèbre. En effet, comme cette dernière, elle peut prendre des valeurs discrètes ou continues. Par contre, à la différence d'une variable classique, une probabilité est associée à chacune des valeurs possibles pour cette variable aléatoire pour indiquer la chance que cette valeur soit choisie.

#### Variabes discrètes

L'explication la plus simple est par un exemple. Si l'on s'intéresse à la somme d'un tirage de deux dés, il n'y a aucune différence si les dés indiquent (1,6) ou (3,4). Seule la somme des deux dés est importante. Il est possible de faire totalement abstraction des éléments individuels pour ne prendre en compte que le résultat global. De cet exemple, en prenant  $\mathcal{X}$  comme la somme des deux dés, il est simple de détailler les différentes

valeurs que peut prendre cette variable :

$$\begin{aligned}
 P\{\mathcal{X} = 2\} &= P(1,1) = \frac{1}{36}, \\
 P\{\mathcal{X} = 3\} &= P(1,2),(2,1) = \frac{2}{36}, \\
 P\{\mathcal{X} = 4\} &= P(1,3),(2,2),(3,1) = \frac{3}{36}, \\
 P\{\mathcal{X} = 5\} &= P(1,4),(2,3),(3,2),(4,1) = \frac{4}{36}, \\
 P\{\mathcal{X} = 6\} &= P(1,5),(2,4),(3,3),(4,2),(5,1) = \frac{5}{36}, \\
 P\{\mathcal{X} = 7\} &= P(1,6),(2,5),(3,4),(4,3),(5,2),(6,1) = \frac{6}{36}, \\
 P\{\mathcal{X} = 8\} &= P(2,6),(3,5),(4,4),(5,3),(6,2) = \frac{5}{36}, \\
 P\{\mathcal{X} = 9\} &= P(3,6),(4,5),(5,4),(6,3) = \frac{4}{36}, \\
 P\{\mathcal{X} = 10\} &= P(4,6),(5,5),(6,4) = \frac{3}{36}, \\
 P\{\mathcal{X} = 11\} &= P(5,6),(6,5) = \frac{2}{36}, \\
 P\{\mathcal{X} = 12\} &= P(6,6) = \frac{1}{36}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Telle qu'indiquée par l'équation (2.1), la variable discrète  $\mathcal{X}$  est définie sur l'intervalle  $[2,12]$ . Ce résultat s'explique du fait qu'il est impossible d'avoir une somme inférieure à 2 ou supérieure à 12 avec deux chiffres de  $[1, 2, 3, 4, 5, 6]$ . Par la suite, le calcul de la somme des probabilités que  $\mathcal{X}$  peut prendre sur cet intervalle est :

$$\sum_{n=2}^{12} P\{\mathcal{X} = n\} = 1 \tag{2.2}$$

Ce résultat est très intéressant. Sur tout l'intervalle des valeurs que peut prendre  $\mathcal{X}$ , la somme des probabilités est égale à 100%. Donc, il est impossible que la variable  $\mathcal{X}$  puisse prendre une valeur hors de l'intervalle puisque la probabilité à l'extérieur est égale à 0. En généralisant, la somme de  $-\infty$  à  $\infty$  doit être égale à 1.

### Variables continues

À la différence des variables discrètes, une variable continue peut prendre n'importe quelle valeur souvent délimitée entre deux bornes. Par ce fait même, il devient difficile

d'énumérer les valeurs comme à l'équation (2.1). Puisque sur tout intervalle il existe une quantité infinie de valeurs possibles, il est par conséquent impossible d'énumérer de façon discrète la probabilité associée à chaque valeur.

### Fonctions de densité

Au lieu d'énumérer chaque valeur, l'utilisation d'une fonction permet d'être en mesure de calculer la probabilité de chaque valeur. Cette fonction porte le nom de fonction de densité. Ainsi, l'adaptation de l'équation (2.2) pour les variables continues est :

$$P\{\mathcal{X} \in B\} = \int_B f(x) dx \quad (2.3)$$

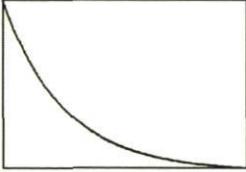
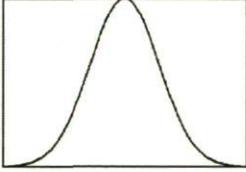
En d'autres termes, l'équation (2.3) représente la probabilité que la variable  $\mathcal{X}$  soit dans l'intervalle  $B$  en intégrant la fonction de densité sur  $B$ . Il faut absolument que l'intégrale sur l'intervalle  $[-\infty, \infty]$  soit égale à 1, comme pour le cas discret :

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (2.4)$$

Par ailleurs, il existe plusieurs fonctions très répandues qui reviennent très souvent dans la littérature et les théories probabilistes. Quelques-unes sont énumérées dans le tableau 2.1.

### Régression

Lorsqu'il y a deux ou plusieurs variables aléatoires, il existe parfois un lien qui unit ces variables. Par exemple, il existe une dépendance entre la quantité de sucre qu'il est possible de dissoudre dans un café et la température de ce dernier. Il est donc important de pouvoir modéliser ce type de lien de façon mathématique par des équations. Pour ce faire, la régression est une méthode statistique permettant de déterminer la relation entre des variables selon les résultats d'une expérimentation. Généralement, les variables dépendantes, ou réponses, sont notées par  $y_1, y_2, \dots, y_m$ , qui sont influencées par  $k$  variables indépendantes,  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . La relation entre les différentes variables est caractérisée par un modèle mathématique et est appelée une équation de régression.

Nom	Fonction de densité	Représentation graphique
Uniforme	$f(x) = \begin{cases} 1, & \alpha < x < \beta \\ 0, & \text{autrement} \end{cases}$	
Exponentielle	$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & \text{si } x \geq 0 \\ 0, & \text{si } x < 0 \end{cases}$	
Normale	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, x \in \mathbb{R}$	

TAB. 2.1: Quelques fonctions de densité

### Linéaire Simple

La méthode de régression linéaire simple permet de déterminer la relation entre une seule variable réponse  $y$  et une variable de régression  $x$  avec comme hypothèse une relation linéaire. Avec des variables continues, pour chaque valeur de  $x$  il existe une valeur  $y$  suivant une droite telle que définie par l'équation :

$$E(x|y) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2.5)$$

où  $\beta_0$  et  $\beta_1$  sont inconnues. Il est à noter qu'il peut exister une différence entre la valeur de  $y$  obtenue et la véritable valeur. C'est pourquoi il faut supposer que pour chaque valeur de  $y$ , il y a une légère erreur  $\epsilon$  qui peut être caractérisée par une moyenne à zéro et une variance  $\sigma^2$  :

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.6)$$

La méthode de régression la plus utilisée est la somme des moindres carrées. Elle consiste à trouver les valeurs des paramètres  $\beta_0$  et  $\beta_1$  de façon à minimiser la somme au carré des  $\epsilon_i$ .

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad (2.7)$$

Une solution possible à l'équation (2.7) est  $\hat{\beta}_0$  et  $\hat{\beta}_1$  et elle doit satisfaire :

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial L}{\partial \beta_0} \right|_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1} &= -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i) = 0 \\ \left. \frac{\partial L}{\partial \beta_1} \right|_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1} &= -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i) x_i = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

La simplification de ces équations donne :

$$\begin{aligned} n\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n y_i \\ \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_i + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 &= \sum_{i=1}^n y_i x_i \end{aligned} \quad (2.9)$$

La solution devient alors :

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (2.10)$$

avec

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (2.11)$$

Très souvent, le numérateur et le dénominateur de l'équation (2.11) sont remplacés par

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (2.12)$$

et

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n y_i (x_i - \bar{x}) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad (2.13)$$

pour devenir :

$$\hat{\beta}_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (2.14)$$

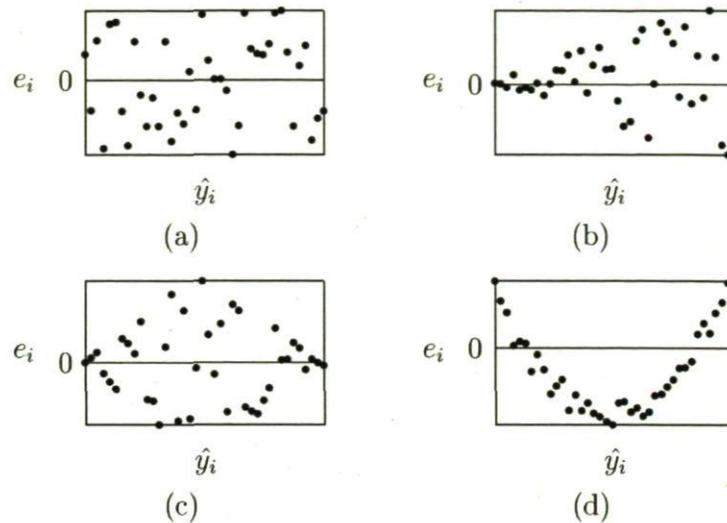
Il est important de noter que cette méthode va toujours donner une réponse. Par exemple, il est toujours possible de tracer une droite dans l'espace des données de manière à minimiser l'erreur entre cette droite et des données. Par contre, dans un cas où les données suivent un autre type de relation, la droite ne représentera pas bien les données.

Puisque la méthode de régression nécessite plusieurs hypothèses de départ (telle qu'une distribution du bruit uniforme), il faut être capable de mesurer la validité du modèle. En effet, il est important de déterminer si la fonction de régression trouvée permet de bien représenter les données. Il existe quelques techniques pour vérifier l'*adéquation* du modèle de régression.

La première s'appelle *Residual Analysis*. Les résidus  $e_i$  sont définis comme étant  $e_i = y_i - \hat{y}_i$  où  $y_i$  est une donnée observée et  $\hat{y}_i$  est la valeur donnée par le modèle. La somme de ces erreurs au carré peut être un indicateur :

$$\begin{aligned} SS_E &= \sum_{i=1}^n e_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Il est également possible de tracer les résultats des  $e_i$  en fonction des  $\hat{y}_i$  pour visualiser la tendance de l'erreur. La figure 2.2 (a) montre un cas où l'erreur sur les données est centrée à zéro et de variance  $\sigma^2$ . En (b), l'erreur s'accroît à mesure que la valeur des données augmente. En (c), il y a une inégalité de la variance. Dans la dernière figure, il manque probablement un terme d'ordre supérieur pour contrer la non-linéarité du phénomène.



TAB. 2.2: Tendances de l'analyse résiduelle

Il est possible aussi d'utiliser le *Lack-of-Fit test*. Ce test permet de savoir si le modèle est correct face aux données recueillies. Le but est de distinguer l'erreur pure ( $SS_{PE}$ ) de l'erreur d'ajustement du modèle ( $SS_{LOF}$ ). En prenant plusieurs valeurs à chaque  $x_i$ , on peut calculer la somme des erreurs pures par une somme des erreurs au carré :

$$SS_{PE} = \sum_{i=1}^m \sum_{u=1}^{n_i} (y_{iu} - \bar{y}_i)^2 \quad (2.16)$$

où  $\bar{y}_i$  représente la moyenne des données observées et  $y_{iu}$  est la donnée observée à l'expérimentation  $u$ . Et il y a  $n_e = \sum_{i=1}^m 1(n_i - 1) = n - m$  degrés de liberté associés à cette équation. Pour déterminer l'erreur due au manque d'ajustement du modèle il suffit de calculer :

$$SS_{LOF} = SS_E - SS_{PE} \quad (2.17)$$

avec  $n - 2 - n_e = m - 2$  degrés de liberté. Le test statistique devient

$$F_0 = \frac{SS_{LOF}/(m - 2)}{SS_{PE}/(n - m)} \quad (2.18)$$

et est rejeté si  $F_0 > F_{\alpha, m-2, n-m}$  où  $\alpha$  sert à déterminer l'intervalle de confiance.

## Multiple

Comme son nom l'indique la régression multiple contient plus d'une variable de régression. La fonction de régression peut être linéaire et sa forme générale devient :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2.19)$$

avec  $k$  variables indépendantes. Cette fonction décrit un hyperplan dans un espace de  $k$  dimensions. Les paramètres  $\beta_j$ ,  $j = 0, 1, \dots, k$  sont les coefficients de régression.

Une application très répandue de la régression multiple est l'approximation de fonction. Ainsi il est possible de représenter des fonctions plus complexes par l'équation 2.19. Il suffit de transformer les fonctions non-linéaires en fonctions linéaires. Par exemple, l'équation

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \epsilon \quad (2.20)$$

devient

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \epsilon \quad (2.21)$$

en remplaçant  $x_1 = x$ ,  $x_2 = x^2$  et  $x_3 = x^3$ . La même technique peut s'avérer très utile pour modéliser des interactions entre des variables. Ainsi,

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (2.22)$$

devient

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \epsilon \quad (2.23)$$

en effectuant la substitution  $x_3 = x_1 x_2$  et  $\beta_3 = \beta_{12}$ .

Pour trouver les valeurs  $\beta_j$ , il faut effectuer la même procédure que dans la section précédente, soit trouver les valeurs  $\beta_j$  qui minimisent

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \quad (2.24)$$

$$= \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right)^2 \quad (2.25)$$

En utilisant les dérivées partielles, les équations peuvent être simplifiées pour donner

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon}, \quad (2.26)$$

où

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$

La minimisation de l'équation 2.24 devient alors

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \boldsymbol{\epsilon}^T \boldsymbol{\epsilon} = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}) \quad (2.27)$$

Après quelques manipulations mathématiques, la solution devient

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (2.28)$$

et le modèle de régression est

$$\hat{y} = \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (2.29)$$

### 2.4.3 Génération de nombres aléatoires

Les nombres aléatoires sont la base de la simulation et il existe diverses façons pour les générer. Cependant, il est impossible de générer un nombre entièrement aléatoire avec un processus déterministe tel qu'un algorithme informatique. Donc, pour avoir un nombre entièrement aléatoire, il faut un processus complètement aléatoire. Mais souvent, il est trop complexe de recourir à ces processus complètement aléatoire alors qu'un procédé pseudo-aléatoire peut faire le travail. Et en simulation, un bon algorithme pseudo-aléatoire fait le travail parfaitement comparativement à la cryptographie où l'aspect complètement aléatoire est nécessaire afin d'atteindre l'objectif de sécurité.

#### Nombres aléatoires uniformes

Pour qu'un procédé de génération puisse être qualifié de bon procédé, il faut que tous les nombres possibles possèdent la même probabilité d'être tiré. Un procédé qui possède des nombres «préférés» ou «rejets» sera rejeté.

Une méthode simple mais très approximative pour vérifier l'uniformité d'un groupe de nombres consiste à tracer ces nombres sur un graphique. Les points devraient être distribués uniformément sur le graphique sans avoir d'amalgames.

Plus rigoureusement, il existe une méthode pour savoir si nous avons un bon processus de génération de nombre aléatoire. Cette méthode consiste en une étude sur plusieurs points qui sont les tests de Diehard développé par Marsaglia au fil des années (voir Marsaglia (1985) et Marsaglia and Zaman (1991) pour plus d'information). En bref, il s'agit d'une batterie de tests statistiques permettant de mesurer la qualité d'un ensemble de nombres aléatoires :

- Birthday Spacings
- Overlapping Permutations
- Ranks of matrices
- Monkey Tests
- Count the 1's
- Parking Lot Test
- Minimum Distance Test
- Random Spheres Test
- The Squeeze Test
- Overlapping Sums Test
- Runs Test
- The Craps Test

### **Nombres entièrement aléatoires**

Dans la nature, il existe plusieurs processus aléatoires. Pour générer un nombre aléatoire à partir d'un processus physique, il faut être en mesure de capter des données qui représentent le processus. Par exemple, il est possible de générer des nombres aléatoires par le traitement d'une image d'un état d'un phénomène physique aléatoire ce qui permet de créer un nombre aléatoire.

La méthode plus traditionnelle consiste à utiliser le bruit. Que ce soit le bruit d'une mauvaise réception d'une chaîne de télévision ou le bruit que l'on peut entendre entre deux stations radios, le bruit est une très bonne source d'aléatoire. D'ailleurs, il existe plusieurs produits sur le marché (comme des périphériques USB) que l'on peut connecter à un ordinateur permettant de générer des nombres aléatoires.

### Algorithme pseudo-aléatoire

Il faut savoir que les nombres pseudo-aléatoires possèdent des propriétés que les nombres entièrement aléatoires n'ont pas. La plus importante est ce qu'on appelle la période. Si un algorithme possède une période de longueur  $n$ , le nombre qui sera généré à la  $n + 1$  itération sera le même que celui généré à la première itération. Cette période devient très importante dans les applications où une très grande quantité de nombres est exigée.

Les algorithmes informatiques, quant à eux, sont caractérisés généralement par la rapidité d'exécution et la quantité de mémoire qu'ils utilisent. Très souvent, la vitesse d'exécution dépend de la quantité de données disponibles en mémoire et vice-versa. Ainsi, il s'agit de trouver le bon compromis entre les deux.

On peut voir à la table 2.3 le temps d'exécution de différents algorithmes<sup>1</sup>. Le MT19937 possède une très grande période et conserve une rapidité comparable aux autres générateurs. Il utilise un peu plus de mémoire que ses compétiteurs mais cela est très négligeable sur la quantité de mémoire disponible dans les ordinateurs d'aujourd'hui.

Algorithme	COMBO	KISS	ran_array	rand	taus88	TT800	MT19937
vitesse (sec.)	11.14	9.24	23.23	9.64	7.95	9.97	10.18
mémoire (mots)	4	5	1000	1	3	25	624
période	$2^{61}$	$2^{127}$	$2^{129}$	$2^{31}$	$2^{88}$	$2^{800} - 1$	$2^{19937} - 1$

TAB. 2.3: Temps d'exécution pour chaque algorithme pour la génération de  $10^7$  nombres (tiré de Matsumoto and Nishimura (1998))

L'algorithme MT19937 possède une limitation majeure. Avec un très grand nombre de sorties, il est possible de prédire le prochain nombre. Ainsi, il est impossible d'utiliser cet algorithme directement dans le domaine de la cryptographie. Dans la simulation par contre, cette limitation ne se transforme pas en problème.

<sup>1</sup>Le générateur rand est inclus dans la librairie standard de programmation C. L'algorithme MT19937 est le générateur Mersenne Twister avec une période de  $2^{19937} - 1$ . Le Mersenne Twister tient son nom au fait qu'il utilise un nombre premier Mersenne. La définition de chacun des autres algorithmes est donnée dans Matsumoto and Nishimura (1998).

## Nombres aléatoires non uniformes

Les nombres générés uniformément sont très utiles mais parfois il est nécessaire d'avoir un nombre selon une distribution précise. Et il serait très complexe de créer un algorithme pour générer directement des nombres selon plusieurs distributions. L'utilisation des nombres générés à la section précédente peuvent très bien faire l'affaire en appliquant quelques manipulations.

Une des méthodes consiste à utiliser l'inverse de la fonction de répartition cumulative de la distribution en question. Cette méthode est exacte s'il est possible de calculer l'inverse de la fonction en question.

L'autre méthode très courante en informatique consiste à discrétiser la fonction de densité. Ainsi, il est possible d'associer une probabilité à chaque intervalle. Une façon simple consiste à calculer la surface sous la courbe de l'intervalle divisé par la surface totale.

Par exemple, pour une distribution normale d'écart-type de 2 centrée à l'origine possédant quatre intervalles, les probabilités associées à chaque intervalle sont inscrit à la figure 2.3. Si le nombre choisi aléatoirement est compris entre  $[0, 0.18877]$ , l'intervalle  $p_0$  sera choisi. S'il est entre  $[0.18877, 0.5]$ , ce sera l'intervalle  $p_1$  et ainsi de suite. Le nombre qui sera généré correspondra au milieu de l'intervalle choisi. Plus le nombre d'intervalles sera grand, moins l'erreur d'approximation sera grande. Par contre, le temps de calcul peut devenir important. Pour réduire un peu cet effet lors de la génération de plusieurs nombres, il suffit de classer les intervalles par ordre décroissant de probabilité. En faisant ainsi, il y aura moins d'intervalles à additionner en moyenne s'il y a beaucoup de nombre à générer.

### 2.4.4 Simulation à évènement discret

Comme il a été mentionné plus tôt, la simulation est présente dans plusieurs domaines. Malgré tout, il est possible de qualifier les simulations selon deux oppositions de courants de pensées, à savoir *centralisée vs. décentralisée* et *évènements vs. temps constant*.

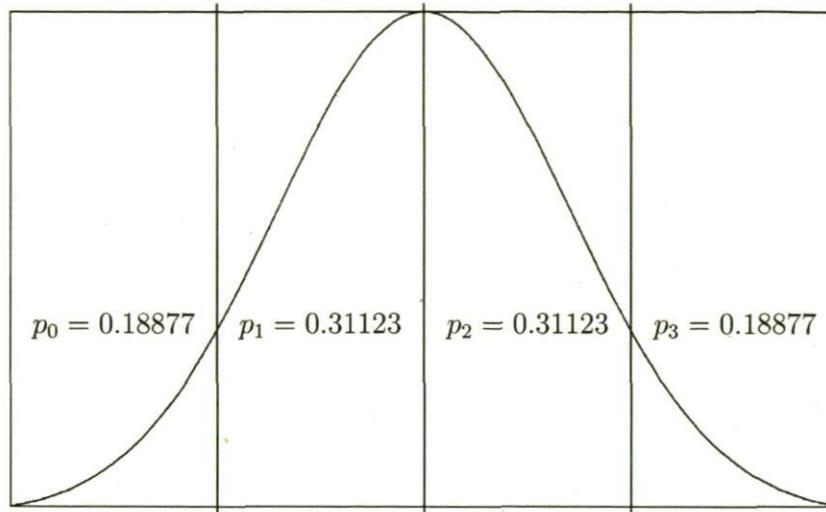


FIG. 2.3: Exemple de quatre intervalles sur une courbe normale

### Centralisée

Cette forme de simulateur a été la première à être exploitée lorsqu'il y a plusieurs composantes dans le simulateur à synchroniser. Son implémentation est moins grande en complexité que son opposante. Par contre, le module servant à la synchronisation peut devenir un goulot d'étranglement s'il doit interagir avec trop de composantes ou si le lien de communication devient surchargé. De plus, le temps doit avancer en même temps pour toutes les composantes, c'est-à-dire que la vitesse maximale est égale ou inférieure à celle de la composante la plus lente. De plus, si le gestionnaire de temps est mis hors tension, la simulation doit être abandonnée.

La figure 2.4 est un exemple simple d'un simulateur où le contrôle du temps se fait de façon centralisée. En effet, l'ordinateur #1 est responsable du temps et contrôle la gestion du temps pour les trois autres.

### Décentralisée

Cette méthode de simulation est venue plus tard que la précédente. Son avantage principal est qu'elle permet de faire avancer le temps de façon asynchrone pour les différentes composantes et ainsi réduire le temps total de simulation. Cette affirmation tient du fait que c'est très rarement la même composante qui retarde le groupe dans

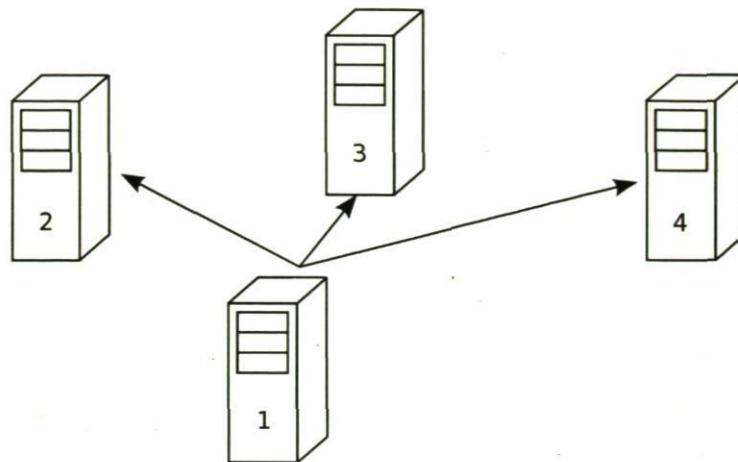


FIG. 2.4: Modèle d'un simulateur centralisé et distribué

une simulation bien distribuée. Si une seule composante est en train de travailler, les autres doivent attendre avant de faire avancer le temps dans un mode centralisé. Dans un mode décentralisé, elles peuvent commencer du nouveau travail s'il est disponible pour prendre un peu d'avance.

Par contre, tous les échanges d'informations entre les composantes doivent être marqué du moment où ils sont envoyés. Ainsi, la composante qui reçoit un message doit être en mesure de faire un retour arrière dans le temps, si c'est le cas, en effaçant toutes les modifications qui ont eu lieu après le moment du message reçu. Dans le cas où une des composantes tombe en panne, la redondance des données présente dans les autres composantes permet plus fréquemment de continuer la simulation.

Chaque composante doit avoir un lien de communication, pas nécessairement direct, avec chaque autre composante comme illustré à la figure 2.5

### Simulation par temps constant

Par définition, une simulation est une représentation de la réalité dans un monde virtuel. Un de ces avantages est la capacité de dilater ou compresser le temps. C'est pourquoi, il est possible de retourner dans le temps, aller dans un futur possible ou voir des phénomènes en accélérés.

Lors d'une simulation par temps constant, la décision la plus importante est la

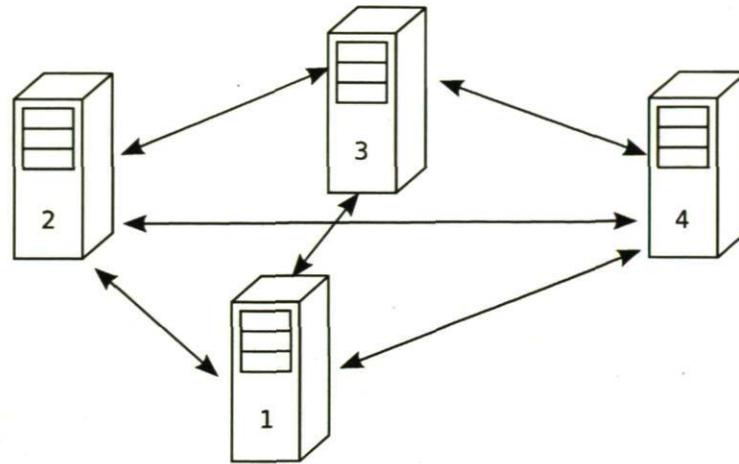


FIG. 2.5: Modèle d'un simulateur décentralisé

grandeur du pas de simulation. Ce pas de simulation permet de faire avancer le temps entre chaque itération. Prenons par exemple la simulation de la collision de deux pierres de curling dont seulement la première est en mouvement. Le seul évènement qui est intéressant est la collision de ces deux pierres à un certain moment  $t$ . À chaque itération, un test est effectué pour savoir si les deux pierres sont en collision. Si le pas de simulation est très petit, il y aura beaucoup de calcul avant le moment où les deux pierres entrent en collision. À l'autre extrême, la collision peut être en retard et même ne jamais être détectée (voir figure 2.6) si le pas  $\Delta t$  n'est pas un multiple de  $t$  au moment de la collision.

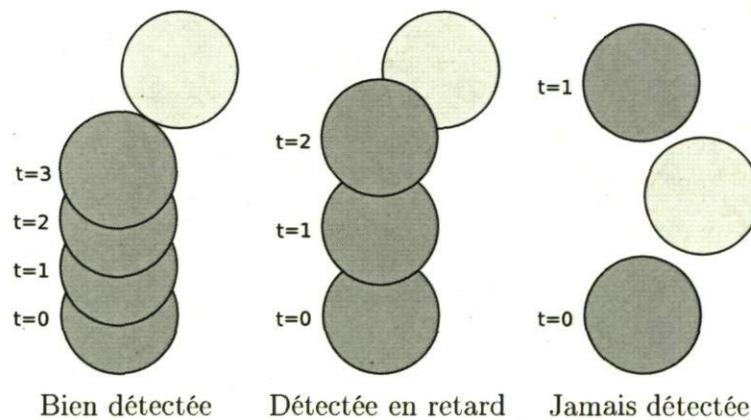


FIG. 2.6: Impact du pas de simulation sur une collision de deux pierre de curling

### **Simulation par évènement discret**

Une seconde méthode de simulation est de plus en plus employée. C'est la simulation par évènement. Les sauts dans le temps entre les différentes itérations ne sont pas connus à l'avance et peuvent être variables. Les composantes déterminent les prochains évènements intéressants pour leurs besoins locaux à intervenir et les classent en ordre chronologique. Ensuite, il s'agit de mettre tous ces évènements en commun et suivre cette liste pour suivre le déroulement de la simulation. Mais cette liste peut s'allonger. En fonction d'un certain état, une composante peut déterminer, en cours de route, qu'elle doit effectuer une étape supplémentaire. Elle n'a qu'à ajouter ce nouvel évènement dans la liste ordonnée commune pour que la simulation reste valide. Le retrait d'un évènement devenu superflu peut se faire également si le besoin devient nécessaire.

#### **2.4.5 Validation et vérification d'une simulation**

Lorsqu'il est question de simulation, les parties les plus souvent évoquées sont les modèles, les données d'entrées et les résultats. Mais une partie très importante manque à cette énumération. C'est la validation / vérification des composantes de la simulation. En omettant cette étape, les résultats ne veulent absolument rien dire car il n'y a aucune assurance que les résultats expriment ce que la simulation cherchait à démontrer.

#### **Étapes d'une bonne simulation**

Tel que défini par Law and McComas (1991), le succès d'une simulation est constitué d'une série d'étapes. Voici une traduction libre de cette liste :

1. Formulation du problème et définition des buts de l'étude
2. Amasser des données et construire un modèle
3. Validation et vérification
4. Création du programme informatique suivi de son débogage
5. Faire les simulations pilotes
6. Validation et vérification
7. Définir les expériences à effectuer
8. Faire les simulations de production
9. Analyser les données de sortie

#### 10. Utiliser les résultats à des fins décisionnelles

Comme il a été question dans l'introduction de cette section, les étapes 3 et 6 sont souvent ignorées. Ces étapes sont cruciales au développement d'un bon simulateur car elles permettent de vérifier la qualité du modèle et par le fait même du simulateur. De plus, elles sont situées au début du développement pour que les erreurs soient détectées rapidement. De cette façon lorsqu'un modèle est déclaré non-valide, le développement retourne aux étapes précédentes.

La création du programme informatique doit se faire selon les règles de l'art. Que ce soit lors de l'utilisation de langages de programmation de haut niveau (C, C#, Java, ...) ou de langages de simulation spécialisés, il est recommandé de développer de façon modulaire. La validation et la vérification se feront plus simplement. De plus, l'utilisation d'un langage de modélisation tel que UML permet très souvent d'éviter certains pièges de la programmation.

### **Validation et vérification de la simulation**

Comme expliqué dans la section précédente, la validation doit se faire tout au long du développement pour assurer une simulation de qualité. Elle doit aussi se faire sur toutes les parties du simulateur.

Selon Balci (1986), il existe 3 types d'erreur pouvant être commises :

1. *Type I* : Les résultats sont rejetés alors qu'ils sont suffisamment crédibles
2. *Type II* : Les résultats sont acceptés alors qu'ils ne sont pas crédibles
3. *Type III* : Le problème formulé ne correspond pas au véritable problème à solutionner

### **Validation et vérification des données**

La première validation à effectuer est la validation des données. Mais qu'est-ce que la validation des données? Très simplement, c'est une vérification de la provenance des données. Ces données doivent représenter toutes les caractéristiques possibles du modèle. Notamment s'il y a des tendances saisonnières, il est nécessaire d'avoir des données sur au moins une année et préférablement plusieurs années pour que chaque saison soit caractérisée par plusieurs données. Si les données proviennent de calculs, la vérification des équations est essentielle.

Bien entendu, ce type de vérification ne permet pas de déceler les erreurs à 100%. Il s'agit de faire une vérification rigoureuse pour partir du bon pied. Il n'existe pas de méthodes acceptées par tous pour faire cette étape. La plupart du temps, la méthode utilisée est si tout le personnel touchant de près à la simulation donne leur approbation, les données sont considérées comme valides.

### **Validation et vérification du modèle conceptuel**

Cette partie consiste à vérifier les différentes théories et hypothèses qui constituent le modèle conceptuel. Une évaluation suggestive du modèle en fonction du problème à résoudre, de sa structure, de sa logique et des mathématiques qui le compose doit être réalisée. Des tests statistiques doivent être appliqués au modèle ainsi qu'une analyse mathématique.

Des vérifications supplémentaires pour déterminer si le niveau de détails du modèle, ainsi que le niveau d'agrégation correspondent bien aux niveaux définis par le problème, peuvent s'avérer nécessaires.

### **Validation opérationnelle**

Les évaluations opérationnelles lors des étapes de validation (voir la liste à la section 2.4.5) peuvent se faire de plusieurs façons. Une méthode très appréciée pour détecter les erreurs est l'animation. L'animation d'une simulation d'un plancher d'une usine peut très rapidement déceler si les employés virtuels effectuent leurs opérations dans l'ordre et en respectant les limites de leurs déplacements (c.-à-d., ils ne passent pas au travers des murs). D'autre part, ces animations permettent de capter l'attention de personnes moins réceptives aux simulations. Par contre, comme il a été mentionné, c'est une technique pour détecter les erreurs. Elle ne permet pas de dire si un modèle est correct, seulement de démontrer si celui-ci est incorrect.

Malgré tous les tests possibles à effectuer, il est généralement trop coûteux, en argent et en temps, de valider un modèle à 100%. En contrepartie, des tests sont effectués jusqu'à ce qu'un niveau de confiance en celui-ci soit jugé acceptable (Sargent, 2005).

### 2.4.6 Simulateur à base d'agents

La simulation à base d'agents est un domaine en pleine expansion et offre de nouvelles possibilités en recherche. Mais, avant tout, il est important de définir ce qu'est un agent. Il y a plusieurs définitions disponibles dans la littérature et il n'existe pas de consensus dans la communauté scientifique. Dans le cadre de ces travaux, la définition retenue est tirée de Russell et al (2003) :

[...] computer agents are expected to have other attributes that distinguish them from mere "programs", such as operating under autonomous control, perceiving their environment, persisting over a prolonged period of time, adapting to change, and being capable of taking on another's goals.

Ainsi, un agent est une entité logicielle autonome qui possède la capacité de percevoir son environnement et d'évoluer à l'intérieur de celui-ci. Lorsque plusieurs agents sont présents à l'intérieur d'un même environnement, il est question d'un système multiagent.

L'interaction entre les différents agents permet l'accomplissement de tâches impossibles pour un agent unique, un peu à la manière d'une colonie de fourmis. Les tâches sont découpées en petits morceaux et c'est la collaboration des différents agents qui permet de résoudre le problème global.

Lors d'une simulation, les agents représentent les différentes parties du système à simuler. Les agents et l'environnement sont modifiés de façon à pouvoir intégrer des composantes de simulation : la gestion du temps, les perturbations extérieures contrôlables ou non ainsi que la prise de mesures de performance.

Plusieurs travaux ont été fait dans ce domaine dans les dernières années. Tout d'abord, dans Fu et al (2000), l'auteur dévoile un cadre théorique de modélisation et de simulation multiagent pour la gestion collaborative de l'inventaire. Ce dernier utilise le modèle de référence des opérations de chaîne d'approvisionnement SCOR (voir Stewart (1997)).

Plusieurs auteurs ont proposé des systèmes multiagents pour faire des simulations sur des chaînes d'approvisionnement. En effet, c'est une tendance très à la mode ces dernières années. Plusieurs chercheurs se sont concentrés sur cette approche. Julka et al (2002), García-Flores and Wang (2002) ainsi que Puigjaner and Guillén-Gosálbez (2008) en sont des exemples qui proposent des cadres pour simuler une chaîne d'approvisionnement dans l'industrie chimique.

D'autres ont appliqué cette approche en collaboration avec des logiciels spécialisés pour la simulation. Entre autres, Galland et al (2005) propose d'utiliser le logiciel *Arena* dans une simulation multiagent.

De leur côté, van der Zee and van der Vorst (2005) présente un cadre de simulation à base d'agents pour une chaîne d'approvisionnement dont l'objectif est d'améliorer la prise de décision. De plus, il présente un exemple concernant une chaîne d'approvisionnement dans les salades réfrigérées.

Quant à Labarthe et al (2006), il démontre que l'utilisation de la coordination dans un réseau de création de valeur permet d'améliorer la performance. Pour pouvoir faire cette démonstration, il a créé un système multiagent qu'il a appliqué à l'industrie des bâtons de golf personnalisés.

Tel que résumé à la section 2.3.1, les auteurs de Frayret et al (2007) proposent un système multiagent pour la planification dans l'industrie forestière. Ce système est réutilisé dans Cid Yáñez et al (2009), Forget et al (2008a), de Santa-Eulalia et al (2009) ainsi que de Santa-Eulalia (2009) afin d'étudier différents problèmes dans l'industrie forestière.

# Chapitre 3

## Conception d'un cas virtuel

Ce chapitre explicitera la nécessité de la création d'un plan d'expérience ainsi que d'un cas virtuel avec les étapes de sa réalisation pour effectuer des simulations. Ce cas représente une usine canadienne moyenne et se nomme Virtual Lumber Case (VLC).

### 3.1 Plan d'expérience

Tout d'abord, il est important de noter qu'il existe une multitude de façons pour réaliser une simulation. Elles peuvent être équivalentes ou bien différentes selon les besoins. La méthode choisie dans le cadre de ces travaux en est une parmi d'autres. Le plan d'expérience permet donc de reproduire les étapes de ces expérimentations de la même manière dont elles se sont déroulées.

#### 3.1.1 Définition des besoins

La première étape à effectuer est de définir à quoi serviront les simulations. En effet, l'idée est de pouvoir analyser les résultats afin de répondre à une question. Pour ces travaux, nous nous intéresserons à l'impact associé à la propagation de la demande à travers un réseau de création de valeur, plus précisément dans une chaîne logistique de bois d'œuvre (voir de Santa-Eulalia et al (2008)).

Pour être en mesure de comparer les résultats des simulations entre-elles, il est nécessaire de définir des indicateurs de performance afin de capturer l'impact de la

propagation de la demande dans le réseau (tel que démontré dans Cid Yáñez et al (2009)).

Tout d'abord, le premier indicateur développé est basé sur le revenu. Cet indicateur permet de calculer la valeur des ventes effectuées tout en tenant compte des pénalités encourues lors des livraisons en retard (Équation 3.1).

$$\text{Revenu}(\$) = \sum_{\text{Demande} \in \text{Demandes}} (\text{Volume}_{\text{Demande}} * \text{PrixUnitaire}) - \sum_{\text{Demande} \in \text{Demandes}} \text{NbreJourRetard}_{\text{Demande}} * \text{Penalité} \quad (3.1)$$

Le second indicateur permet de mesurer le volume total des ventes non-escomptées (Équation 3.2. Une vente non-escomptée est une demande unique qui est planifiée pour être livrée à temps et sans utiliser de produit de substitution ou de rabais, telle que c'est la pratique dans l'industrie du bois d'œuvre.

$$\text{Volume}_{\text{VentesNonEscomptees}} = \sum_{\text{Demande} \in \text{DemandesPrévuesLivréesÀTemps}} \text{Volume}_{\text{Demandes}} \quad (3.2)$$

Pour éviter le cas évident de promettre toutes les livraisons à temps alors qu'il est impossible de le faire, deux autres indicateurs seront utilisés pour mesurer le taux de satisfaction du client. Le premier correspond au niveau de service tel que défini par l'équation 3.3.

$$\text{NiveauDeService}(\%) = \frac{\sum_{\text{Demande} \in \text{DemandesLivréesÀTemps}} \text{Demande}}{\sum_{\text{Demande} \in \text{DemandesConfirmées}} \text{Demande}} \quad (3.3)$$

Le dernier indicateur mesure les arrérages (Équation 3.4). Celui-ci permet de quantifier le temps qu'une demande restera en retard lorsqu'elle n'est pas comblée à temps.

$$\text{Arrérage(jours)} = \frac{\sum_{\text{Demande} \in \text{DemandesLivréesEnRetard}} \text{Arrérage(jour)}_{\text{Demande}}}{\sum_{\text{Volume}_{\text{Demande}} \in \text{DemandesLivréesEnRetard}} \text{Volume}_{\text{Demande}}} \quad (3.4)$$

### 3.1.2 Configuration de la simulation

Les simulations nécessiteront la plateforme expérimentale de planification FORAC telle que sommairement présentée à la section 2.4.6. La première étape sera de configurer les agents pour être utilisés dans une simulation. Cette étape est décrite plus en profondeur à la section 3.3 ainsi qu'à l'annexe A.

Une fois la configuration des agents terminée, il ne reste qu'à définir les paramètres de simulation. Tout d'abord, les expérimentations se dérouleront sur un horizon de 6 mois. Selon les expérimentations, il y aura un cycle de planification à chaque semaine ou au deux semaines. De plus, la propagation de la demande ne doit pas se faire dans certaines simulations.

Le tableau 3.1 synthétise les différentes configurations pour les expérimentations.

## 3.2 Évaluation de la situation actuelle

La création d'un cas virtuel passe nécessairement par une étape d'analyse de la situation actuelle. En effet, compte tenu du fait que les entreprises accumulent des données, il est intéressant de commencer par analyser celles-ci.

Les données disponibles varient d'une entreprise à l'autre puisque chaque scierie a ses propres caractéristiques et particularités. Ainsi, s'il était possible de modéliser exactement une scierie existante, cette dernière pourrait avoir une influence sur les résultats de la simulation. En effet, au fil du temps, les gens exploitant la scierie ont optimisé, par expérimentations et expérience, les opérations de façon à atteindre les critères de performance fixés par les dirigeants.

Cette influence modifie la production d'une scierie. Si les dirigeants ont comme seul objectif de maximiser le volume de production, tous les employés s'affaireront à atteindre et même surpasser cet objectif. Avec une modélisation de cette usine, il serait plus difficile de faire une étude sur la rentabilité de chaque produit puisque toutes les opérations seraient optimisées de façon à maximiser le volume de production sans tenir compte de ce nouvel indicateur.

De plus, au cours des années, le personnel des ventes aura acquis une certaine expertise à prévoir quelle sera le profil de production durant l'année. En sachant cela, les

	Client (Volume de demandes)	Type de propagation de la demande	Réplifications	Résultat
1	Spot (200%) Contrat (0%,20%,40%,65%)	Axé sur la demande	5	Section 4.2.4
2	Spot (130%)	Axé sur l'offre Axé sur la demande	10	Section 5.2.4
3	Spot (130%)	Axé sur l'offre Axé sur la demande Axé sur la demande filtrée	20	Section 5.2.4

TAB. 3.1: Description des différentes expérimentations

vendeurs seront en mesure de refuser certaines demandes des clients parce que ce profil de demande ne correspond pas au profil de production de l'entreprise. Et, traditionnellement dans le domaine de l'industrie forestière, ces données, à savoir les commandes qui sont refusées, ne sont conservées nulle part par les entreprises. Ainsi, si l'entreprise prend la décision de faire une simulation où elle modifie sa production et garde les mêmes historiques de demandes, ses indicateurs de performance risquent de diminuer dû au fait que ces demandes correspondent, dans un certain sens, à la production actuelle.

L'idée de concevoir un cas virtuel provient de ces limitations. De plus, il est beaucoup plus facile de publier les résultats d'un cas virtuel ; les entreprises étant réticentes à divulguer la configuration de leurs usines afin de conserver leurs avantages stratégiques.

De façon générale, la production du bois d'œuvre passe par trois étapes principales. Tout d'abord, il y a le sciage. À cette étape, les billes provenant de la forêt sont écorcées et passent à travers différentes machines pour être découpées en plusieurs morceaux. Les planches résultantes sont envoyées à l'étape suivante alors que les autres produits, tels que les copeaux, les sciures et les écorces sont vendus à des clients internes (une autre division de la même entreprise) ou externes. À la deuxième étape, les planches sont séchées dans un environnement contrôlé de façon à réduire la quantité d'humidité présente et ainsi réduire les risques que les planches courbent lorsqu'elles vieilliront au fil des ans dans les structures où elles seront utilisées. À la fin, les planches sont rabotées pour obtenir leurs dimensions finales et ensuite gradées conformément aux standards présents dans l'industrie. Les planches sont alors emballées selon le désir du client et prêtes pour l'expédition.

### 3.3 Modélisation et équilibrage d'une scierie

D'après l'évaluation de différentes scieries de l'industrie québécoise forestière, il en ressort que l'étape de séchage est très souvent l'étape goulot dans ce réseau de création de valeur. Cela signifie que l'utilisation de la capacité des séchoirs est au maximum et qu'il est difficilement possible d'augmenter la production de l'usine sans augmenter la capacité des séchoirs. Cette contrainte devra donc être présente dans le cas virtuel pour représenter cette réalité de l'industrie québécoise.

Cette contrainte permet donc de définir la capacité de l'usine et ainsi de déterminer de façon agrégée les capacités individuelles de chaque unité et des approvisionnements en billes de la forêt. Le choix a été fait de développer un modèle d'usine où la production annuelle est légèrement plus élevée que la moyenne des usines québécoises puisque les usines récentes sont habituellement plus grosses pour augmenter la productivité. Ainsi, ce modèle correspondra à une usine d'environ 100 à 120 millions de PMP<sup>1</sup>.

De plus, pour bien représenter la réalité québécoise, il faut que l'usine soit en mesure de recevoir en approvisionnement les deux essences de bois majoritaires dans nos forêts, soit le sapin et l'épinette. Cette distinction de l'essence est importante jusqu'aux séchoirs puisque les temps de séchage sont différents et influencent la capacité; le temps de séchage plus long du sapin fait en sorte que la capacité du séchoir diminue. La proportion choisie est de 60% d'épinette et 40% de sapin.

En utilisant le tableau 3.2 et la définition des processus à la section A.2, il est possible de déterminer grossièrement la capacité des machines, à savoir la productivité à l'heure pour correspondre aux objectifs fixé précédemment. Ce calendrier a été construit en utilisant deux quarts de travail par jour et ce, durant toute la semaine.

Lorsque tous ces paramètres ont été fixés, la première étude a été d'observer comment se comportait chaque unité dans le modèle. Dans un modèle de cet ampleur, il est pratiquement impossible que la simulation fonctionne du premier coup. Des ajustements ont été nécessaires pour que la simulation se déroule comme il se doit. Voici une liste sommaire des modifications apportées en cours de développement du cas d'étude :

- Réduction de l'approvisionnement total en billes
- Changement des proportions d'approvisionnement entre les différentes classes de bille

---

<sup>1</sup>1 pied mesure de planche est une unité de mesure qui correspond à une planche de 12 pouces de longueur, par 12 pouces de largeur et 1 pouce d'épaisseur

	Sciage	Séchage	Finition
Heures par jour	16	24	16
Jours par semaine	7	7	7

TAB. 3.2: Calendrier des opérations

- Séparation de la machine de la principale ligne de sciage en deux entités pour mieux répartir la consommation des différentes classes de bille
- Mise à jour des inventaires initiaux de chaque agent

Un problème majeur a été constaté lors des premières expérimentations. En effet, la configuration d'usine créée avait beaucoup de difficultés à combler une demande lorsque celle-ci ne correspondait pas au profil de production du modèle qui planifie sans tenir compte de la demande, ce qui est la façon de faire traditionnelle dans l'industrie forestière. Par sa nature, le réseau est porté à mettre l'accent sur les produits ayant le plus de valeur au moment de la prise de décision. En revanche, le client tente d'acheter les produits dont le prix est sous-évalué puisqu'ils représentent une belle opportunité d'affaire. Cette «confrontation» *client-fournisseur* est donc un enjeu majeur dans l'industrie.

Il est nécessaire d'ajouter que les entreprises existent dans le but de faire un profit et ce dernier est généré avec les revenus des ventes faites aux différents clients. Ainsi, ceux-ci n'achèteront que des produits qui satisferont leurs besoins. Par ce fait même, une entreprise doit obligatoirement fabriquer des produits dont ses clients auront besoin pour qu'elle puisse survivre.

Pour tenter de résoudre cette confrontation, il est suggéré de propager, d'une manière ou d'une autre, la demande à travers le réseau pour que chaque unité puisse avoir une idée de la composition du carnet de commandes et ainsi mieux répondre à la demande du client final. C'est ce qui s'appelle une approche axée sur la demande (*demand-driven* en anglais), contrairement à une approche axée sur l'offre (*supply-driven*) où l'objectif est de produire la plus grande valeur en prenant pour acquis qu'il existe toujours une opportunité de vente pour tout produit fabriqué.

Pour en revenir aux premières expérimentations, il était impossible pour la configuration d'usine créée de répondre à la demande avec une approche axée sur la demande dû aux systèmes de planification implantés dans la PEPF. Conséquemment, ces algorithmes ne pouvaient en aucun cas substituer un produit pour un autre équivalent. Lors de ces expérimentations, ce défaut est apparu très rapidement. L'unité de séchage,

pour répondre à la demande de l'unité de finition, concevait son plan de demandes à 100% d'épinette car cette essence lui coûtait moins chère à transformer puisqu'elle prend moins de temps à sécher. De son côté, l'approvisionnement à l'unité de sciage est fixe et déjà déterminé par la proportion 60%-40%. Ainsi, cet unité remplissait donc la demande jusqu'à ce que son approvisionnement d'épinette soit épuisé et indiquait à l'unité de séchage que seulement une partie de sa demande a été possible de combler. Dû à la nature intrinsèque du problème, il a été nécessaire d'abolir l'approvisionnement de sapin et de se concentrer sur l'épinette afin de ne pas biaiser les résultats des expérimentations.

### 3.4 Caractérisation des clients

Une fois le modèle de l'usine complété, l'étape suivante a été de caractériser les clients. Comme pour la modélisation de l'usine, la caractérisation a commencée par un processus d'analyse des données disponibles de la demande. Il a été possible d'obtenir quelques années des ventes d'une entreprise québécoise pour faire cette étude. La première analyse a été de trouver la proportion de la demande selon le profil des planches tel qu'indiqué dans le tableau 3.3, la longueur des planches (voir tableau 3.4) ainsi que la qualité des planches (voir tableau 3.5).

Une fois cette caractérisation terminée, il faut déterminer quelle sera la quantité totale de demande qui sera générée par les clients. Une trop petite quantité ne permettra pas de bien évaluer les scénarios qui seront simulés alors qu'une trop grande quantité congestionnera le modèle. Pour trouver cette valeur, il a fallu effectuer plusieurs simulations afin de trouver le point où le modèle répondait bien, à savoir le point où le modèle réussit à «vendre» la majorité de sa production sans que ce soit la totalité. Si le modèle était capable de vendre la totalité de sa production, il serait difficile, voire même impossible, de comparer deux scénarios puisque le scénario de base posséderait

Profil de planche	Proportion de la demande
2x3	20%
2x4	45%
2x6	35%
Total	100%

TAB. 3.3: Répartition de la demande selon le profil des planches

Longueur de planche	Proportion de la demande
8'	7.3%
10'	3.8%
12'	15.7%
14'	18.6%
16'	54.6%
Total	100%

TAB. 3.4: Répartition de la demande selon la longueur des planches

Qualité de planche	Proportion de la demande
#1-2	84.5%
#3	11.3%
#4	4.2%
Total	100%

TAB. 3.5: Répartition de la demande selon la classe qualité des planches

déjà toutes les capacités nécessaires pour répondre à la demande et ne pourrait pas être amélioré face aux indicateurs utilisés.

Afin de représenter différents types de client, deux modèles de clients ont été développés. Le premier représente un client sporadique pour une demande unique ; c'est le client spot. Avec ce client, le fournisseur négocie avec le client pour une demande unique. Cette négociation n'a aucun impact sur les autres interactions que ces deux partenaires pourraient avoir dans le futur. À l'opposé, le client contractuel possède une relation de confiance avec son fournisseur qui est présente à plus long terme. L'objectif est de bâtir une relation durable afin d'assurer une qualité de service au client et de stabiliser la demande au niveau du fournisseur.

En sachant cela, il a été possible de fixer la quantité totale de demande à un peu plus de la production totale, soit environ 130% ou 200% de cette production selon l'expérimentation utilisée. C'est cette quantité qu'utilisera le client spot pour générer les demandes qui seront envoyées à l'usine virtuelle. La demande générée par ce type de client est ponctuelle et sporadique contrairement au client contrat pour qui la demande est plus régulière.

Le client contractuel utilisera la même répartition de la demande mais sa quantité totale dépendra du scénario simulé. Effectivement, la quantité de demande totale demandée sera de 0%, 20%, 40% ou 65% de la production totale et dépendra du scénario utilisé.

## Chapitre 4

# Simulation multi-agent dans l'industrie forestière

Le présent chapitre expose l'article «Intégration d'outils APS dans une simulation multiagent : Une application à l'industrie du bois d'œuvre» présenté à la 7<sup>ième</sup> Conférence Internationale de Modélisation et Simulation qui a eu lieu à Paris en France du 31 mars au 2 avril 2008.

Au cours de cet article un cas virtuel est développé et présenté. De plus, une expérimentation est présentée afin d'analyser le volume de contrat qu'une usine peut accepter pour d'augmenter son revenu. À cette fin, des pénalités sont imposées lorsque les livraisons s'effectuent en retard. Cette analyse utilise un horizon très court pour tirer des résultats.

### 4.1 Résumé

Ces travaux proposent l'intégration d'un système avancé de planification pour l'industrie du sciage de bois résineux dans une simulation multi-agent. L'objectif visé est de permettre la simulation de différentes conditions du marché afin d'évaluer et de comparer l'impact économique de stratégies de pilotage ou de gestion de la demande dans un réseau de création de valeur. Dans cet article, un simulateur à base d'agents est présenté de même qu'un agent simulant le comportement des clients. Un cas d'étude (Virtual Lumber Case) est présenté afin d'illustrer le potentiel d'utilisation du simulateur. Ce cas représente une entreprise canadienne de production de bois d'œu-

vre, de taille moyenne. Le développement du cas VLC constitue un maillon clé dans le développement de cette recherche; il facilite la création de scénarios de simulation et l'étude de différentes stratégies propres à l'industrie des produits forestiers.

## 4.2 Intégration d'outils APS dans une simulation multi-agent : Une application à l'industrie du bois d'oeuvre

S. LEMIEUX, S. D'AMOURS,  
J. GAUDREAU

J.-M. FRAYRET

Université Laval  
Département de génie mécanique  
Québec, (Québec) Canada, G1K 7P4  
{sebastien.lemieux, sophie.damours,  
jonathan.gaudreault}@forac.ulaval.ca

École Polytechnique de Montréal  
2500, chemin de Polytechnique  
Montréal, (Québec) Canada, H3T 1J4  
jean-marc.frayret@polymtl.ca

**Mots-clés :** Simulation, Réseau de création de valeur, Advanced Planning System, Multi-agents, Opérations, Bois d'oeuvre

### 4.2.1 Introduction

Les entreprises canadiennes de l'industrie des produits forestiers font face à une compétition soutenue de la part des marchés émergents. Face à ces défis, elles doivent se démarquer en visant des niches où elles excelleront du point de vue du niveau de service tout en dégageant un bénéfice accru. La réorganisation du réseau de création de valeur, de même qu'une meilleure planification/synchronisation des opérations à l'intérieur de ce réseau constituent des moyens possibles.

Pour ces raisons, il existe un besoin réel pour des outils permettant de mesurer l'impact économique de ces changements. Les systèmes avancés de planification (Advanced Planning and Scheduling (APS)) font partis de ces outils. Ils permettent d'aider les entreprises en utilisant des algorithmes et des modèles pour faire la planification (Stadtler, 2005). Par contre, le problème de planification dans l'industrie forestière est très différent de ceux des secteurs manufacturiers traditionnels (Rönqvist, 2003).

Lors de travaux antérieurs, nous avons présenté un système APS distribué (d-APS) permettant de planifier/synchroniser les opérations d'un réseau de production de bois d'œuvre (plateforme expérimentale FORAC). Il permet l'utilisation d'algorithmes de planification spécifiques à chaque type d'usine du réseau, et l'utilisation de mécanismes de coordination.

Dans le cadre des présents travaux, nous avons développé un simulateur permettant d'évaluer la performance d'un réseau de création de valeur pour différents scénarios de marché. Ces travaux sont les premiers pas vers un simulateur malléable constitué d'un outil APS et d'agents client. Nous présentons d'abord (section 4.2.2), un cas virtuel de réseau de production de bois d'œuvre que nous appelons Virtual Lumber Case (VLC). Ce cas est inspiré de données réelles provenant de l'industrie canadienne. Nous avons modélisé ce cas sur la plateforme expérimentale FORAC

Nous avons ensuite développé un simulateur (section 4.2.3) constitué de trois modules principaux : un système APS mimant le comportement du réseau de production, un agent client simulant le comportement du marché, et finalement, le simulateur en tant que tel, utilisé par le décideur pour comparer différents scénarios (voir Figure 4.1).

À la section suivante, nous utilisons ce système pour évaluer la stratégie de vente et plus spécifiquement, la proportion des volumes disponibles qui devraient être dirigés vers des clients prêts à consentir des contrats.

Par contre, il est nécessaire de tenir compte de certaines considérations si ces simulations servent pour prendre des décisions. Il faut être en mesure d'évaluer la validité des simulations (Balci, 1986) (Sargent, 1992) et cette validation doit se faire tout le long du développement de la simulation (Robinson, 2002). Compte-tenu de la taille des problèmes à traiter, ces étapes deviennent particulièrement importantes.

#### 4.2.2 Virtual Lumber Case

Virtual Lumber Case représente un réseau de création de valeur d'une entreprise canadienne typique de production de bois d'œuvre. Les données sont inspirées de celles d'entreprises réelles de l'est du Canada. Étant donné l'ampleur de cette expérimentation, il est impossible de donner tous les détails dans cet article. Par contre, l'ensemble des données du cas est disponible sur demande à [info@forac.ulaval.ca](mailto:info@forac.ulaval.ca).

La modélisation de ce réseau a été réalisée avec un outil APS développé par le Consortium de recherche FORAC appelé plateforme expérimentale FORAC (D'Amours

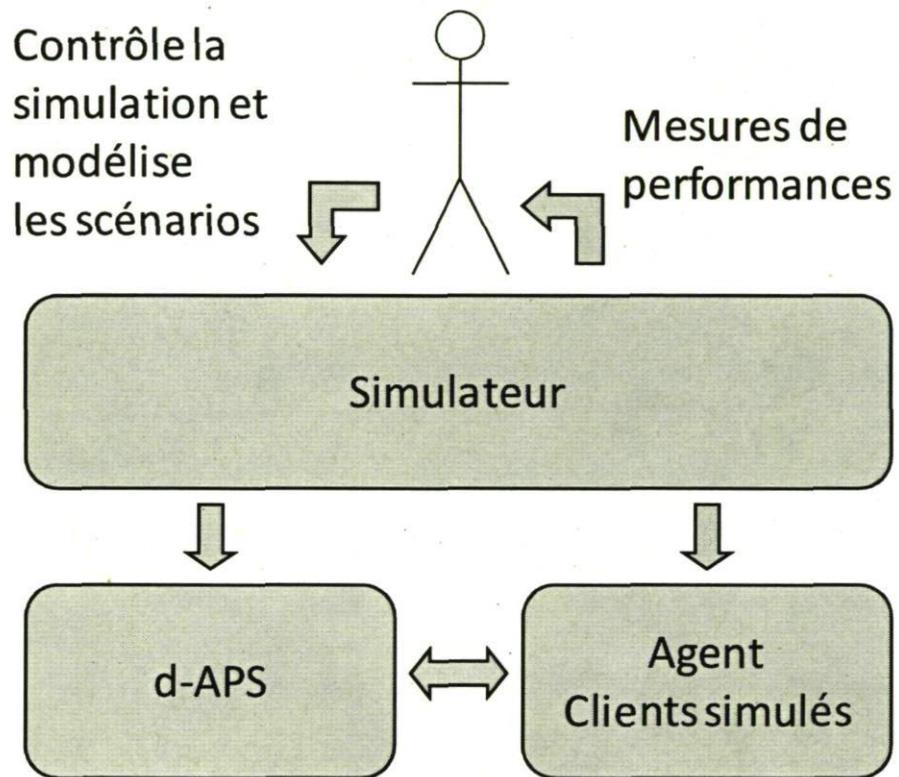


FIG. 4.1: Composition du simulateur

et al., 2006) (Frayret et al., 2007). Il s'agit d'un APS distribué à base d'agent (d-APS) : chaque agent contient un modèle d'une unité de production du réseau et dispose d'algorithmes spécialisés pour planifier les opérations de cette unité.

### **Plateforme expérimentale FORAC de planification**

Les agents de la plateforme expérimentale communiquent entre eux à l'aide de protocoles inspirés du standard FIPA-ACL ([www.fipa.org](http://www.fipa.org)). Ces protocoles de communication déterminent l'évolution d'une conversation entre deux agents (ex : Figure 4.2).

Chaque agent est spécialisé selon la fonction de l'unité de production qu'il représente. Chacun dispose d'un engin spécifique pour la planification de ses opérations. Les agents s'échangent des plans de demande et d'approvisionnement de manière à coordonner les opérations de chacun et ainsi obtenir un plan global pour le réseau de création de valeur.

### **Le réseau de production et de distribution**

Le réseau étudié est illustré à la Figure 4.3. Le flux de matière partant de l'agent Achats et se terminant à l'agent Ventes.

L'objectif premier lors de l'élaboration de ce cas était de créer une usine de taille moyenne dans l'industrie forestière canadienne.

L'agent Achat planifie les approvisionnements en billes. Ces billes sont ensuite passées au sciage et débitées selon des patrons de débitage spécifique pour en faire des sciages (pièces de bois). L'agent sciage planifie les opérations de sciage. Les sciages sont ensuite séchés, dans le respect de patrons de chargement des séchoirs. L'agent séchage planifie les opérations de séchage. Les sciages terminent leurs processus de transformation à la finition. Cette étape consiste à débiter en longueur les sciages séchés et leur donner leurs caractéristiques finales. L'agent finition planifie les opérations de la finition. Les sciages sont promis et livrés à des clients. L'agent Ventes s'occupe de planifier les livraisons aux clients.

Les agents gèrent les informations concernant les produits, les processeurs et les processus de chacune des unités du réseau. Les agents Sciage, Séchage et Finition per-

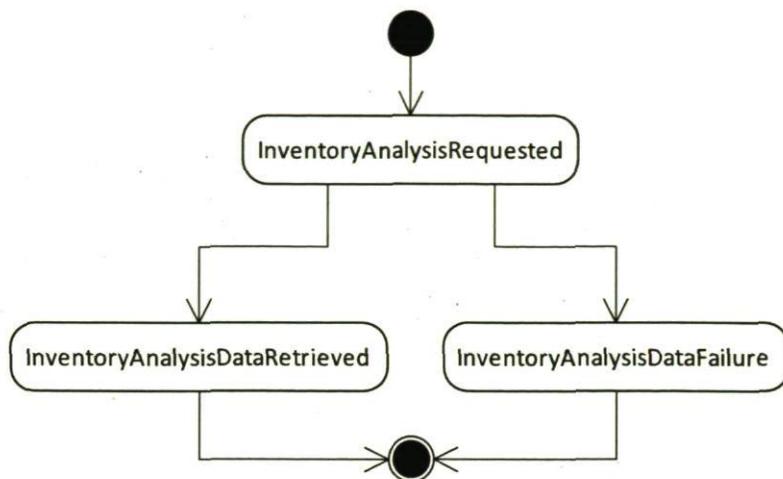


FIG. 4.2: Protocole pour connaître le niveau d'inventaire d'un produit d'un agent

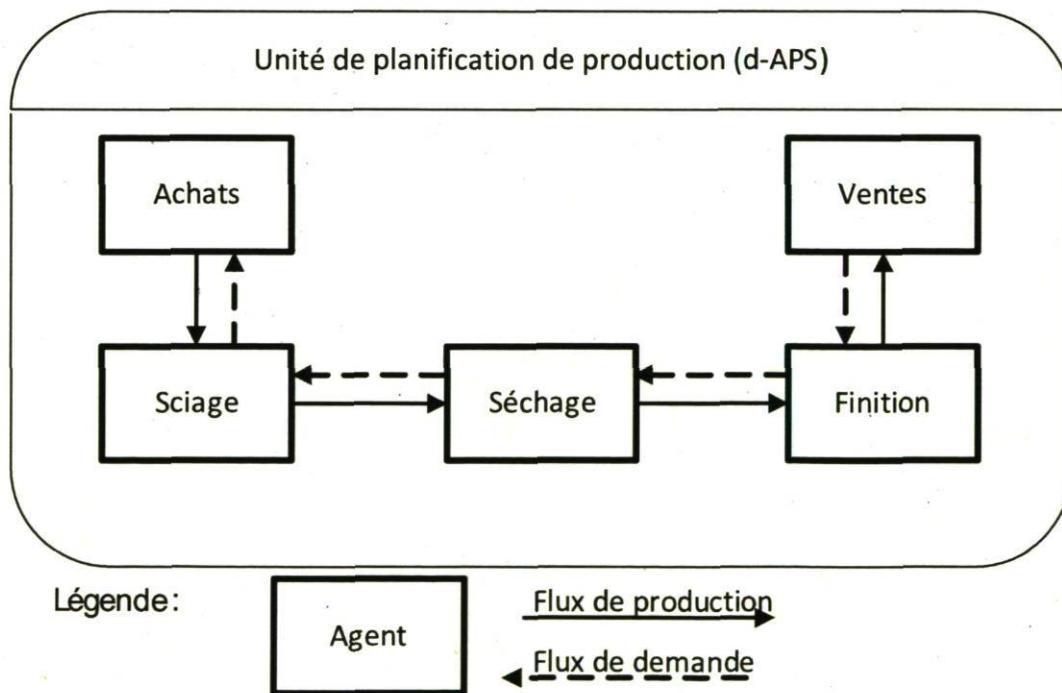


FIG. 4.3: Agents de la plateforme expérimentale FORAC

mettent de faire la planification des opérations à l'aide respectivement de modèles mathématiques, programmation par contraintes et d'heuristiques (voir Tableau 4.1).

Le Tableau 4.2 précise les caractéristiques du cas Virtual Lumber Case du point de vue de chacune des unités d'affaires : produits, processeurs, processus, etc. L'unité de sciage peut consommer huit types de billes différentes. Il contient deux lignes de sciage. Pour chaque type de billes entrant, une série de patrons de débitages est possible. Le choix du patron et de la bille définira le panier de produit réalisé.

Pour l'unité de séchage, quinze différents produits peuvent être séchés dans un des sept séchoirs (processeurs) disponibles selon 180 processus de séchages différents. En termes de capacité, cette unité de production est le goulot du réseau.

L'unité de finition peut transformer quinze différents produits en 45 produits finis. Un processus de finition existe pour chacun des produits pouvant entrer sur la ligne de finition. Finalement, les ventes peuvent livrer aux clients 45 produits différents.

### **Modélisation des clients**

Deux types de processus de demande sont modélisés dans ces travaux (« spot » et « contrat »).

La vente des produits du bois peut s'opérer via des marchés dits « spot », ce qui est commun à la vente de produits de commodité : le client se présente de façon sporadique à des intervalles aléatoires. Il négocie un prix, un volume et une date de livraison. Le client et le producteur sont alors opportunistes. Ils n'ont aucune autre obligation l'un envers l'autre, autre que celle de respecter cette vente.

Le mode « contrat » implique une relation et certaines attentes de part et d'autres. Le contrat peut spécifier plusieurs exigences telles des garanties d'achat ou de livraison, des conditions de fixation des prix et des paiements. On y associe des livraisons répétées sur un horizon de temps.

Il existe peu de données disponibles permettant de modéliser le comportement des clients de l'industrie du bois d'œuvre. Généralement, les entreprises ne conservent les informations que sur les commandes qu'elles ont acceptées. De plus, si un produit de remplacement a été offert, la demande originale n'apparaît pas dans les bases de données. Il est ainsi très difficile de reproduire exactement les processus de demande à partir de bases de données historiques.

	Agent Sciage	Agent Séchage	Agent Finition
Objectifs	Min. des retards	Min. des retards	Min. des retards
	Max. de la valeur de production	Max. de la valeur de production	Max. de la valeur de production
	Min. des coûts		Max. de l'utilisation des processeurs
Caractérisation des processus	Flux des produits divergeant	Flux des produits divergeant	Flux des produits divergeant
	Co-production	Co-production	Co-production
	Processus alternatifs	Processus alternatifs	Processus alternatifs
	Seulement des processus compatibles peuvent être exécutés sur le quart de production		Seulement des processus compatibles peuvent être exécutés sur le quart de production
Paramètres de planification	Calendrier de la capacité par machine	Calendrier de la capacité par machine	Calendrier de la capacité par machine
	Opérations gelées	Opérations gelées	Opérations gelées
	Ventes maximales par produits	Coût d'opération	Mode d'exploration dans l'arbre des solutions
	Coût des produits bruts		Durée de production minimale par famille
	Coût d'inventaire		
Méthode d'optimisation	Programmation linéaire mixte en nombres entiers	Programmation par contraintes	Heuristique

TAB. 4.1: Différences des problèmes des unités de sciage, de séchage et de finition

	Sciage	Séchage	Finition	Ventes
Nb de produits de consommation	8	15	15	45
Nb de produits fabriqués	15	15	45	45 (spot) 15 (contrat)
Processeurs	1 Ligne 8'-16' 1 Ligne 8'	5 petits séchoirs 2 gros séchoirs Zones à l'air libre	1 Ligne	Pas applicable
Processus	37	180	15	Pas applicable

TAB. 4.2: Configuration des unités de sciage, de séchage, de finition et de ventes

Puisque les données sont limitées, il a été nécessaire de poser certaines hypothèses. Ces hypothèses ont permis de modéliser statistiquement les processus de demande. Nous avons modélisé de façon indépendante les paramètres d'une commande : le délai entre l'appel du client et sa date de livraison, la date de livraison, l'intervalle entre deux commandes, etc. Nous avons lié la génération des paramètres de volumes de chacune des commandes ainsi que des volumes cumulés de demande par produit. L'établissement de ce dernier paramètre a été faite sur la base de l'historique des livraisons d'une entreprise de l'industrie.

Le volume total demandé a été fixé selon un pourcentage de la capacité de l'usine en production poussé. Pour ce faire, on a utilisé le simulateur pour optimiser le réseau sur la base d'une production complètement en flux poussé. Dans le contexte de la production de bois de sciage, cela signifie que les ressources sont utilisées pour produire les produits à plus forte valeur espérée. Cette première simulation a permis de définir des volumes réels et réalisables de production. Nous avons ensuite établi, pour le client spot, une demande totale équivalent à deux fois la capacité de l'usine.

**Générateur de nombres aléatoire** L'agent Clients Simulés simule le comportement des clients. C'est à lui que revient la tâche de générer les caractéristiques des demandes des commandes qui seront utilisées par la suite dans la simulation. Il est paramétrisé à l'aide des variables aléatoires mentionnées précédemment.

La quantité importante de nombres aléatoires nécessaires implique qu'il faut un générateur rapide et malléable capable de servir les besoins des différents modèles. Le générateur de nombres uniformes utilisé est le Mersenne Twister (Mastsumoto et

Nishimura, 1998). Ce générateur permet de produire des nombres aléatoires avec une période très grande sans ralentir l'exécution de l'algorithme.

Par contre, des nombres qui suivent une distribution uniforme ne sont pas d'un très grand secours lorsque le besoin est de paramétrer des demandes clients. Ainsi, il est nécessaire de les transformer en des nombres suivant différentes distributions, telles que triangulaire, normale et exponentielle (Ross, 1993).

La méthode utilisée ici est simple mais efficace. On discrétise la fonction de densité de la distribution désirée. Par exemple, pour générer un nombre selon une loi normale, il suffit de diviser la représentation graphique en un nombre d'intervalles qui conviennent au besoin. À chaque intervalle est associée une probabilité qui est calculé par son aire sous la courbe divisée par l'aire totale. Ainsi, en tirant un nombre uniforme dans l'intervalle  $[0,1]$ , il est possible de trouver la valeur correspondante utilisant les poids cumulatifs de chaque intervalle. Avec l'exemple de la Figure 4.4, si la valeur tirée est 0.63, ce sera la valeur du troisième intervalle qui sera choisie. Bien entendu, il est possible d'utiliser des approximations pour les aires sous la courbe si le nombre d'intervalles tend à être élevé. À partir de ce point, un nombre aléatoire correspondra à un nombre aléatoire suivant la distribution désirée.

**Modèle pour client spot** L'idée générale est de représenter le comportement d'un client qui demande à son fournisseur s'il est capable de livrer une quantité d'un produit pour une date donnée. Si le fournisseur lui répond par l'affirmative, le client confirme cette commande. Sinon, l'hypothèse est faite que le client retire sa commande et appelle un autre de ses fournisseurs (celui-ci ne faisant pas partie de la simulation).

Comme spécifié précédemment, toutes les demandes sont générées au début de la simulation. Mais, pour qu'elles soient utilisables dans la simulation, il faut ajouter une caractéristique supplémentaire à chaque demande : le moment où le client transmettrait sa commande.

Donc, en résumé, pour chaque relation client-fournisseur-produit, l'agent génère une liste de demandes qui possèdent plusieurs caractéristiques :

- Date de livraison (moment où l'acheteur désire son produit)
- Quantité
- Date effective (moment où l'acheteur transmet sa commande)
- Status (initialement à prévue)

L'algorithme de génération est décrit à la Figure 4.5. La première étape consiste à tirer un nombre aléatoire qui correspond à la quantité totale qui sera demandée pour

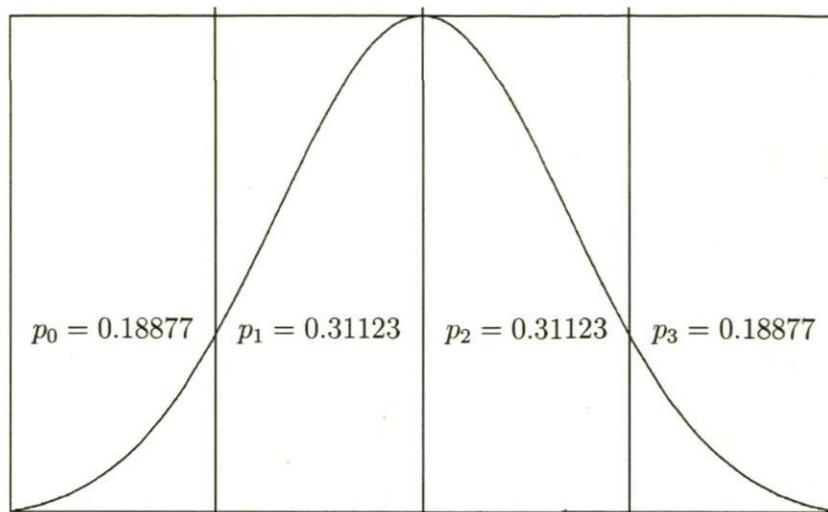


FIG. 4.4: Exemple de discrétisation d'une distribution normale

cette relation sur l'horizon de simulation. Tant que la quantité totale n'est pas écoulee, l'algorithme crée des demandes en tirant une quantité, une date de livraison selon la saisonnalité et soustrait un délai pour obtenir la date effective.

**Modèle pour client contrat** Le client contrat, par opposition au client spot, ne possède pas la capacité de supprimer une demande si elle n'est pas comblée à temps. L'hypothèse est faite qu'une entente d'exclusivité lie le fournisseur au client, et que le fournisseur devrait être en mesure de respecter les demandes de son client sous peine de payer des pénalités.

Par ailleurs, les demandes du client contrat surviennent à des intervalles relativement réguliers comparativement aux demandes spot où il n'existe aucune régularité de ce genre.

La méthode pour générer les demandes diffère également. La première partie de l'algorithme (Figure 4.6) sert à établir la liste des dates associées aux demandes. En partant de la date de début de simulation, la liste est remplie en tirant un intervalle avec la prochaine demande jusqu'à ce que la date ne soit plus dans l'horizon de simulation.

Une fois cette liste complétée, la quantité totale sera tirée et répartie en utilisant des facteurs de saisonnalité. Pour chaque date de commande dans la liste, l'algorithme lui attribue un pourcentage de commande représentant le poids de la date dans la courbe

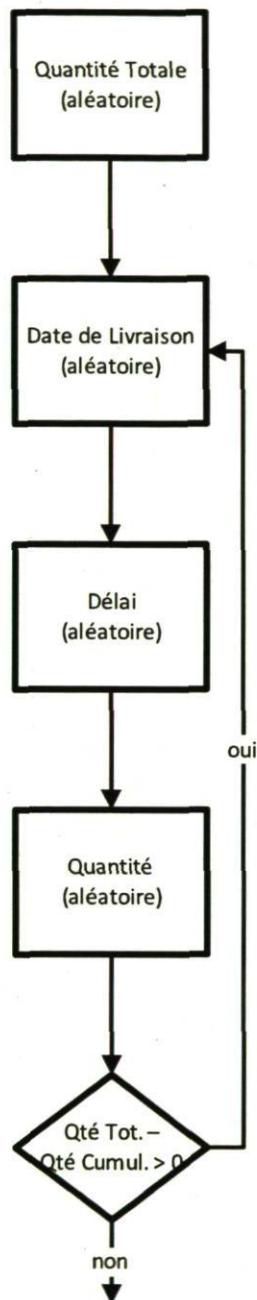


FIG. 4.5: Algorithme de génération de demandes spot

de saisonnalité sur le poids total.

La dernière étape consiste à appliquer un bruit à chaque quantité pour ne pas que la quantité demandée suive exactement la courbe de saisonnalité. Généralement, ce sera un bruit gaussien, de moyenne centrée à un et d'un écart-type représentant le degré de variation, qui multipliera la quantité.

### 4.2.3 Simulateur

Nous avons développé un simulateur constitué de trois modules principaux : le système APS destiné à mimer le comportement du réseau de production, un agent client simulant le comportement du marché, et le simulateur en tant que tel, utilisé par l'utilisateur pour comparer différents scénarios.

#### Gestion du temps

La gestion du temps se fait à l'aide d'une horloge centralisée. Tous les agents utilisent la même horloge et ainsi il n'y a pas de risque qu'un agent se retrouve en retard (ou en avance) des autres. Une autre solution souvent utilisée consiste à permettre à chaque agent d'utiliser sa propre horloge. Les messages contiennent toujours la date de transmission ce qui permet de faire la coordination entre les agents. C'est la première solution qui a été implantée ; l'architecture permettait de faire cette modification rapidement et simplement.

#### Fonctionnement de la simulation

La simulation utilise les événements discrets pour fonctionner (Ross, 2002). Le module de simulation possède une liste d'action lui permettant de contrôler la simulation. Chaque action contient les caractéristiques suivantes :

- Nom de l'agent
- Nom de l'action
- Paramètres
- Date de déclenchement

Lorsqu'une action est déclenchée, le simulateur envoie à l'agent ciblé le nom de l'action à effectuer ainsi que les paramètres s'il y a lieu. L'agent qui reçoit cette information

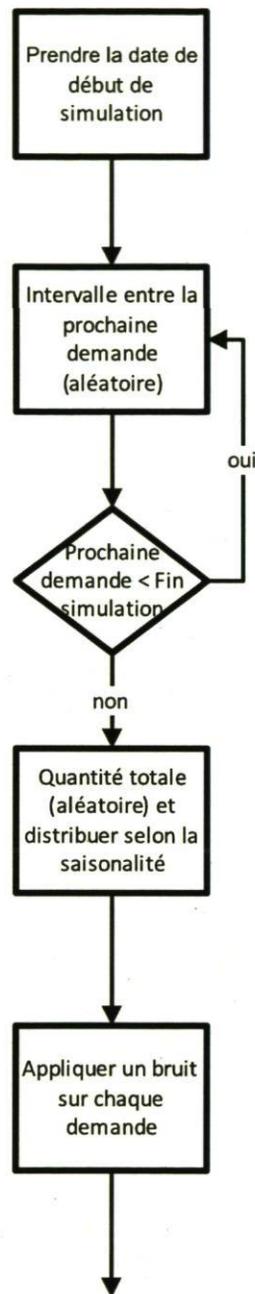


FIG. 4.6: Algorithme de génération de demandes contrat

indique au simulateur qu'il est en train de travailler et effectue l'action. Une fois l'action complétée, l'agent le signale au simulateur et retourne en veille.

L'action effectuée par un agent peut déclencher une action par un autre agent. Le premier agent envoie alors un message vers le second. Ce dernier récupère le message et ajoute une demande d'action dans la liste du simulateur. L'action peut être déclenchée immédiatement ou plus tard selon les besoins de l'agent demandeur.

Le simulateur possède une liste de tous les agents participant à la simulation et connaît en tout temps leur état (calcul ou veille). Lorsqu'au moins un agent travaille, le temps avance en temps réel. Au moment où tous les agents sont en mode veille, le simulateur cherche la prochaine action à réaliser, avance l'horloge en conséquence et demande à l'agent ciblé de réaliser l'action

### **Agent Clients Simulés**

En simulation, l'agent Clients Simulés utilise les demandes générées à la section 2.3 selon le modèle comportemental spécifique à chaque type de client, soit le client de type «spot» et celui de type «contrat».

**Modèle comportemental du client spot** A l'initialisation de la simulation, toutes les demandes qui doivent être envoyées avant la date de début de la simulation sont ajoutées au plan de demande pour la création du plan initial. Le plan de demande résultant est par la suite envoyé à l'agent Ventés. Les unités de production essaieront de satisfaire le mieux possible les demandes qui sont confirmées. La capacité des machines restante servira à faire du flux poussé puisque les demandes prévues seront comblées par l'ATP (Available to promise).

Le client détermine ensuite quelles sont les demandes prévues qui sont comblées à temps avec l'approvisionnement reçu. Elles deviendront des demandes confirmées. S'il reste des demandes qui n'ont pas été confirmées, le client les retirera du plan et le nouveau plan sera envoyé à l'unité de planification de production.

Si la simulation n'est pas complétée, l'agent créera un nouveau plan de demande. Ce plan contiendra les demandes confirmées du plan précédent généré lors de la première boucle de l'algorithme (Figure 4.7). De plus, il ajoutera toutes les nouvelles demandes dont la date effective se situe avant la date courante de simulation.

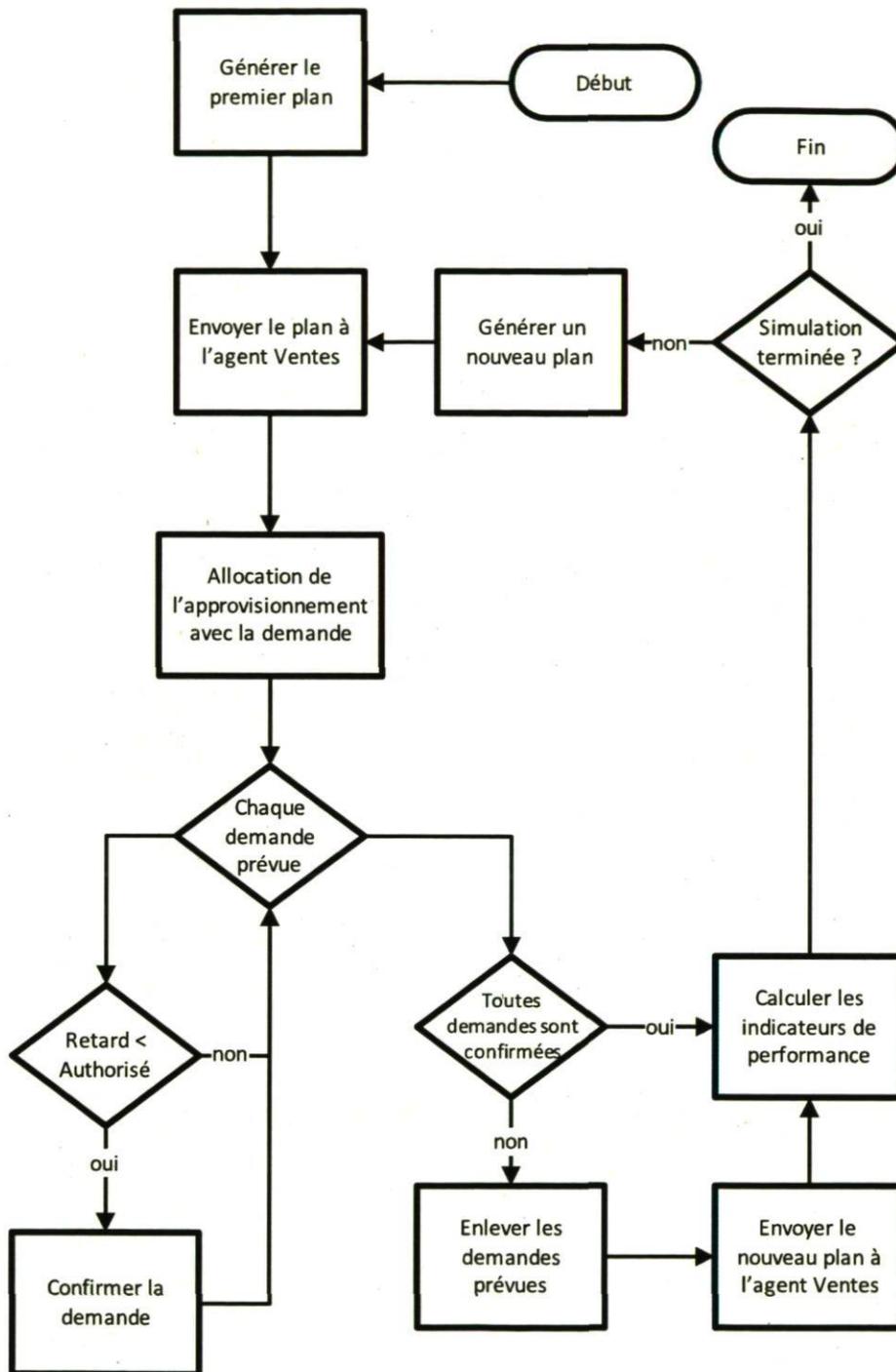


FIG. 4.7: Comportement lors d'une simulation du client spot

**Modèle comportemental du client contrat** Avant d'expliquer ce modèle, il convient de mentionner que le plan de demande se divise en trois horizons : définitif, évolutif et provisoire. Ces horizons servent à perturber la demande suivant le principe que plus la demande est éloignée dans le futur, plus elle est incertaine. Dans l'horizon définitif qui débute à la date de simulation courante, les demandes sont fixes et ne peuvent pas changer. À l'autre extrémité, dans l'horizon provisoire il n'existe aucune contrainte sur les demandes et elles peuvent être modifiées complètement. Entre les deux, les quantités des demandes peuvent changer mais l'augmentation ou la diminution est limitée par une contrainte de variation.

Lors de l'initialisation de la simulation, le client crée un plan vide (Figure 4.8). À ce plan, l'agent ajoute les demandes qui sont dans les trois horizons. Ce plan de demande est envoyé au réseau de production et il cherche à satisfaire cette demande.

Si la simulation n'est pas terminée, une copie de ce plan est faite, les horizons sont déplacés selon la nouvelle date courante et les nouvelles demandes qui font parties de ces horizons sont ajoutées. Les demandes existantes dans l'horizon évolutif et provisoire sont modifiées en tenant compte des limites s'il y en a.

### Applications possibles

Les applications possibles pour le système proposé sont nombreuses. Il est possible d'étudier l'impact de décisions stratégiques, tactiques ou opérationnelles et d'observer les conséquences qu'elles pourraient avoir. Il devient aussi plus facile de répondre à des situations qui pourraient avoir des impacts importants. « Qu'arriverait-il si une de mes machines brisait ? Quels seraient les dommages si un de mes fournisseurs tombait en grève ? Quel est l'impact de l'ajout d'un quart de travail dans cette unité de production ? »

De plus, avec un tel système, il devient beaucoup plus facile de conseiller des industriels. En effet, en utilisant le même système que les chercheurs, il est plus aisé pour eux d'interpréter les résultats puisqu'ils sont habitués à cet outil.

#### 4.2.4 Expérimentation

Le cas et le système introduits précédemment ont été utilisés pour réaliser l'expérimentation suivante. Celle-ci portait sur la segmentation de la clientèle. Plus spécifique-

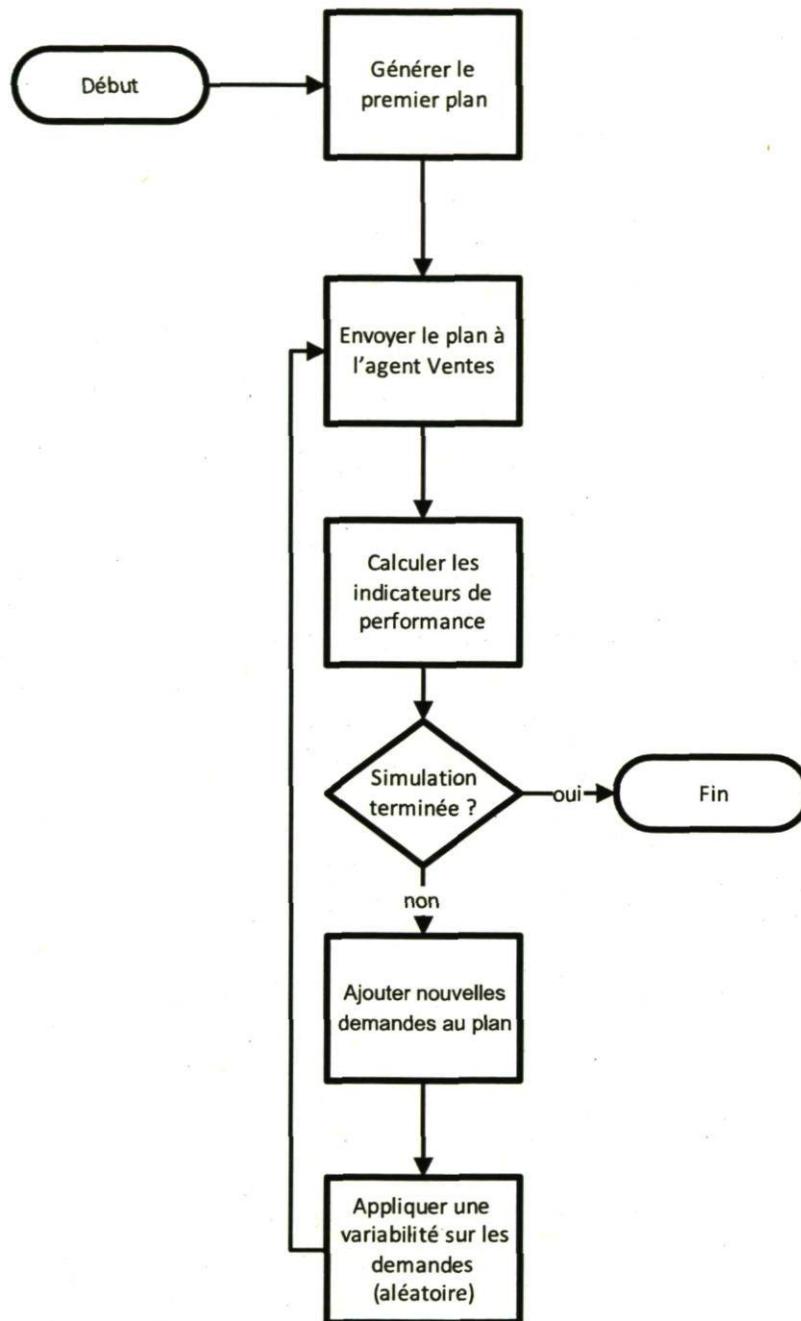


FIG. 4.8: Comportement lors d'une simulation du client contrat

ment, il s'agissait de déterminer le pourcentage de la production devant être vendue à contrat (0%, 20%, 40% ou 65%) qui maximise les profits en considérant qu'en cas de retard une pénalité de 5% de la valeur des produits par jour de retard était imposée.

Les agents ont des horizons de planification de 30 jours. À chaque semaine, l'agent client envoie un plan de demande mis à jour (spot et contrat). Cet événement cause une replanification à travers le réseau de production. Pour chaque volume de contrat, cinq répliques de l'expérience ont été réalisées. Le minimum et le maximum de revenu obtenus (moins les pénalités) sont illustrés sur la Figure 4.9.

Selon les résultats obtenus et pour le cas Virtual Lumber Case tel qu'il a été modélisé, la quantité optimale de contrat serait autour de 40% de la capacité de production. Une fois dépassée ce taux, la moyenne des revenus tend à diminuer. Également, il y a alors une moins grande différence entre le maximum et le minimum.

#### 4.2.5 Conclusion

À notre connaissance, il n'existe pas de simulateur dont le cœur est composé d'un outil APS. Ces travaux constituent un premier pas dans ce sens. Ils présentent des résultats et l'utilisation d'un agent pour la génération de la demande. L'objectif de cet article était de montrer comment un système APS peut être utilisé pour répondre aux interrogations des décideurs. Donc, un simulateur a été développé en utilisant la plateforme expérimentale FORAC et en y intégrant de nouveaux modules.

Comme travaux futurs, nous entendons procéder à l'ajout d'un agent Fournisseurs Simulés. Il permettrait de rendre les simulations davantage conformes à la réalité en donnant la possibilité de modifier l'approvisionnement en billes en cours de la simulation. Nous devons également incorporer des mécanismes permettant de perturber la production en cours de simulation. Cela permettra d'étudier la robustesse des algorithmes utilisés par le système APS.

#### Remerciements

Ce travail a été financé par le Consortium de Recherche FORAC et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

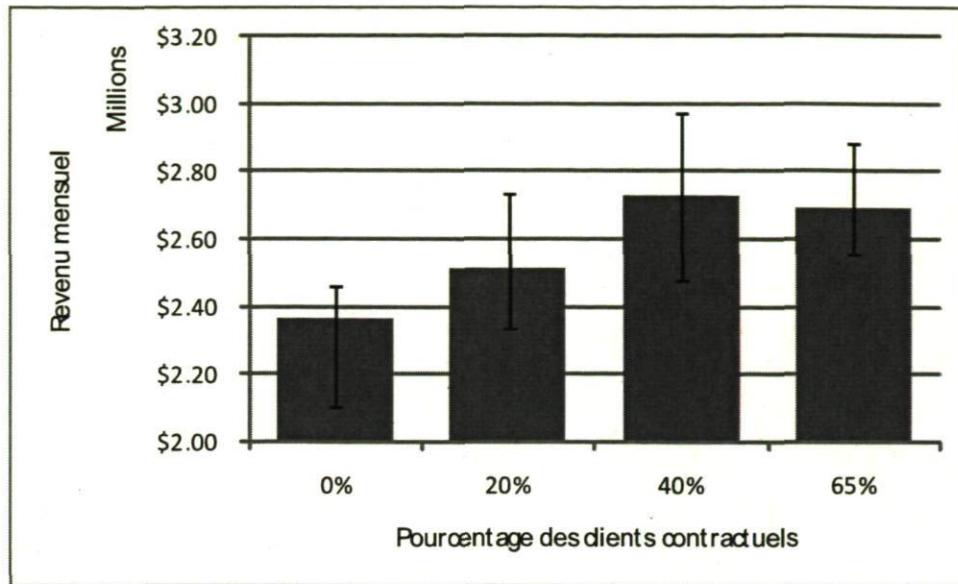


FIG. 4.9: Revenu mensuel selon le pourcentage de client contractuel (résultats prélim.)

## Références

Balci O., 1986. Credibility Assessment of simulation results. *Proceedings of the 1986 Winter Simulation Conference*, J. Wilson, J. Henriksen, S. Roberts (eds.), p. 38-44.

D'Amours, S., J.-M. Frayret, A. Rousseau, S. Harvey, P. Plamondon and P. Forget, 2006. Information Technology for Balanced Manufacturing Systems, in *IFIP International Federation for Information Processing*, Volume 220, ed. Shen, W., (Boston : Springer), p. 17-26.

Frayret J.-M., S. D'Amours, A. Rousseau, S. Harvey, J. Gaudreault, 2007. Agent-based Supply Chain Planning in the Forest Products Industry, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 358-391.

Matsumoto M and T. Nishimura, 1998. Mersenne Twister : A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 8(1), p. 3-30.

Robinson S., 2002. General concepts of quality for discrete-event simulation. *European Journal of Operational Research*, 138(1), p. 103-177.

Rönnqvist M., 2003 Optimization in forestry, *Mathematical Programming*, Series B 97 : p. 267-284.

Ross S. M., 1993. Introduction to probability models, *Academic Press*, 5e edition.

Ross S. M., 2002. Simulation, *Academic Press*, 3e edition.

Sargent R. G., 1992. Validation and verification of simulation models. *Proceedings of the 1986 Winter Simulation Conference*, ed. J. J. Swain, D. Goldsman, R. C. Crain, and J. R. Wilson, p. 104-114.

Stadtler H., 2005. Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges. *European Journal of Operational Research*, 163(3), p. 575-588.

## Chapitre 5

# Décisions tactiques influencées par la simulation multiagent

Ce chapitre présente l'article «Agent-based simulation to anticipate impacts of tactical supply chain decisions in the lumber industry» soumis au journal *Engineering Applications of Artificial Intelligence* en août 2009.

L'expérimentation présentée dans cet article utilise le concept d'horizon roulant ce qui permet de mieux représenter la réalité (comparativement à l'expérimentation du chapitre 4). De plus, au lieu d'utiliser un seul indicateur de performance, trois sont utilisés afin de mesurer la performance (le volume de ventes non-escomptées, le niveau de service ainsi que les retards), aussi bien du côté du manufacturier que du client. L'idée dans cette expérimentation est de mesurer l'impact de l'implémentation d'une nouvelle stratégie de planification dans cette industrie, soit une approche axée sur la demande.

### 5.1 Résumé

Cet article propose l'intégration d'un système avancé de planification et d'ordonancement (en anglais *Advanced Planning and Scheduling* et son acronyme *APS*) dans une simulation multiagent pour l'industrie du bois d'œuvre. Les objectifs sont de simuler différentes situations de marché et d'évaluer les impacts de différentes stratégies de planification pour une chaîne d'approvisionnement. Pour cela, nous avons développé un simulateur consistant (1) d'un agent logiciel émulant plusieurs types de clients, con-

necté à (2) un APS distribué composé d'agents logiciels interdépendants qui effectue les opérations de planification des différentes unités d'affaire d'une chaîne d'approvisionnement en bois d'œuvre et (3) des composantes de simulation tel que la gestion du temps et des indicateurs de performance utilisés par le décideur. Un cas d'étude (Virtual Lumber Case) a été développé pour illustrer le potentiel de ce simulateur qui représente un entreprise canadienne virtuelle de bois d'œuvre. Deux expérimentations sont présentées pour démontrer les possibilités de ce type de simulateur. Ces expérimentations démontre que lorsque la planification intègre les demandes des clients finaux, il est possible d'augmenter le volume des ventes non-escomptées jusqu'à 40% tout en améliorant le niveau de service offert au client final.

## 5.2 Agent-based simulation to anticipate impacts of tactical supply chain decision-making in the lumber industry

Sébastien Lemieux<sup>a,1</sup>, Sophie D'Amours<sup>a,1</sup>, Jonathan Gaudreault<sup>a,1</sup>, Jean-Marc Frayret<sup>b,1</sup>

<sup>a</sup> *Université Laval, Département de génie mécanique, 1065 av. de la Médecine, Québec, (Québec) Canada, G1V 0A6*

<sup>b</sup> *École Polytechnique de Montréal, Département de mathématiques et génie industriel, 2500, chemin de Polytechnique, Montréal, (Québec) Canada, H3T 1J4*

**Key words** : Distributed Simulation, Value Creation Network, Advanced Planning System, Multi-agent, Lumber

### 5.2.1 Introduction

The Canadian lumber industry has been facing difficult challenges for the last few years as demand and prices for lumber products are decreasing in the North American market, mainly due to the financial crisis and the explosion of the credit bubble which had caused the number of housing starts to decline. Faced with these challenges, lumber producers need to increase the operational efficiency of their supply chain in order to improve their service levels and increase value creation. Improving the design of these

---

<sup>1</sup>FORAC Research Consortium and CIRRELT

value creation networks and their planning and coordination strategies are possible means to attain these goals.

Consequently, there is a need for tools aiming to anticipate the economical impacts of these new designs. Adapted Advanced Planning and Scheduling (APS) systems can be part of these tools if coupled with simulators. APS systems provide companies with algorithms and models for planning their different activities from procurement to distribution (Stadtler, 2005). These tools are well developed for discrete manufacturing and assembly types of production but less so for processes -based manufacturing and divergent production. This is especially true in the forest industry as reported by Rönqvist (2003) and D'Amours et al. (2007), and the need for specific solutions is well acknowledged (Gronalt and Rauch, 2008).

In previous work, an adapted distributed APS (dAPS) system used to plan and synchronize operations within a lumber supply chain was presented (Frayret et al., 2007). This FORAC Experimental Planning Platform (FEPP) allows the use of planning algorithms specific to each type of activity in the network as well as the use of coordination mechanisms to synchronize the different plans (Forget et al., 2006). In order to improve the design of the value creation networks, Cid Yáñez et al. (2008) exploited the FEPP in order to assess the impact of introducing demand information at various points in the planning process. These first contributions clearly demonstrated the value of demand information in terms of inventory decrease and increase of customer satisfaction.

Using simulation for such a decision-making context requires the ability to develop an operating simulation framework around the FEPP and the capability to verify the validity of the experiments carried out. Given the size of the problem to be addressed, these steps were particularly important in this study. It is indeed necessary to assess the validity of simulations (Balci, 1986; Sargent, 2005) and this validation should be done throughout the development of the simulations as proposed by Robinson (2002).

In this paper, a simulator which aims at evaluating the performance of a supply chain under different planning strategies is introduced. Building on the framework for distributed decision making proposed by Schneeweiss (2003), this work is a step towards the development of a flexible simulator consisting of APS tools and simulated customer agents to model a supply chain and its customers as introduced by Petrovic et al. (1998) and Chang and Makatsoris (2001). Figure 5.1 demonstrates how the simulator is composed of these modules (the FEPP, simulation components and a simulated customer agent) to simulate the scenarios and how it interacts with the user.

The FEPP serves to simulate the decision planning process of the business units

involved in the supply chain. The *Simulated Customer Agent* is used to simulate the ordering behaviour of the customers. The simulation components provide the simulating environment and permit an accelerated simulation of the supply chain. Finally, the user controls the simulations and uses different KPI to evaluate the performance of the different planning strategies.

In order to illustrate the contribution of this paper, an enterprise test bench representing a typical Canadian lumber production network called Virtual Lumber Case (VLC) is used. It is explained in Section 5.2.2 and is derived from actual data from the Canadian industry. The main advantage of using a virtual case is that it is possible to discuss all information regarding it without having to worry about disclosing proprietary information. The case information is available on request to the authors.

The proposed simulator is discussed in Section 5.2.3. It consists of three main modules : the FEPP mimicking the behaviour of the planning process, different components such as time management and performance indicators used by the decision maker to compare different scenarios, and finally, a simulated customer agent simulating the behaviour of the final customers.

In Section 5.2.4, this simulator is used to assess the planning strategy of a lumber supply chain and more specifically, the impact of non-discounted sales volume using demand-driven approach compared to the more traditional supply-driven approach. The results are presented in Section 5.2.5. The last part (Section 5.2.6) will conclude by discussions on the main contributions of this paper and exposing the future paths to explore.

## 5.2.2 Virtual Lumber Case

The Virtual Lumber Case is an enterprise test bench, which is basically a detailed supply chain model of a typical Canadian enterprise in the softwood lumber industry. It is a work in progress that includes data describing manufacturing processes, products and transportation resources that are based on different existing eastern Canadian sawmills. These data were used to configure a particular instantiation of the FEPP (D'Amours et al., 2006; Frayret et al., 2007). This platform is a dAPS system, in which each agent contains a detailed model of the organizational unit of the supply chain it represents. Furthermore, each agent is able to use specialized algorithms to plan operations and uses coordination mechanisms to synchronize its plans with other agents.

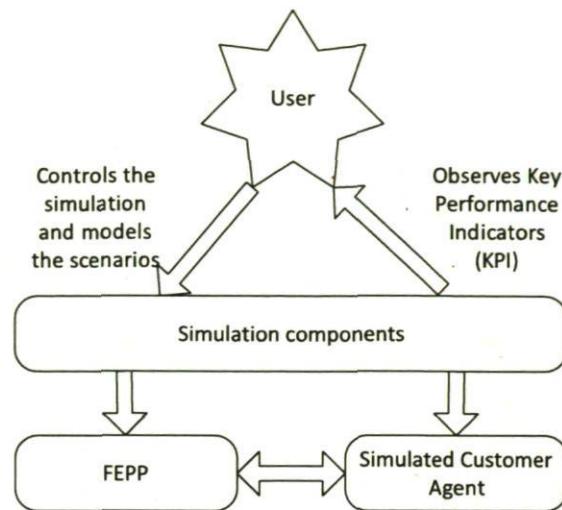


FIG. 5.1: Conceptual simulator composition

### FORAC Experimental Planning Platform (FEPP)

The FEPP aims to create feasible and coordinated plans which are optimized to fulfil the demand of the final customers of the value creation network. These plans consist of detailed production schedules and take into account multiple constraints that are specific to each organizational unit. The FEPP is based on a multi-agent approach to coordinate the collective definition of each agent's production schedule, which uses coordination protocols (called conversations) to specify how agents should interact in various situations.

**Architecture Overview** The FEPP is composed of agents that interact with each other in order to solve the global lumber supply chain planning problem. Several conversation protocols and agent behaviours have been implemented in order to produce optimized solutions in various situations.

The configuration of the platform follows an organizational design approach that consists in the division of the supply chain into business units. In turn, this division into business units is based on the natural heterogeneity of the production process. In other words, the overall problem is split into several smaller sub-problems, each of which results in the managerial problem of a single organizational unit. Consequently, every agent is modelled after a specific organizational problem. This gives each agent the ability to solve a smaller scale problem using adapted tools. The collaboration, or the

cooperation, of all agents present in the supply chain solves the value creation network global problem.

Many functionalities are shared by all agents. For example, they can interact with each other or perform tasks when necessary and by definition, they are autonomous. Moreover, by the way in which the FEPP is conceived, each agent can be represented as a modular block that can be assembled with others to model a supply chain.

Four basic types of agents were developed as seen in Figure 5.2 : *Planning Unit*, *Source*, *Make* and *Deliver*. The *Planning Unit agent* leads agents in the global environment ; it helps internal agents communicate with external agents, those that are in a different planning unit. A planning unit usually corresponds to a physical site in a company.

The *Source agent* plans the procurement of the products or raw materials needed by other agents in the planning unit and allocates them to the desired location. The *Deliver agent*, on the opposite side of the planning unit in Figure 5.2, is responsible for managing relationships with customers and selling manufactured goods. It optimizes the flows of material between an external customer and the supplier inside the planning unit. Finally, *make agents* are responsible for planning the operations of the production or distribution of products inside the planning unit. They are specifically designed to fit the production problem of each organizational unit. The most common types in lumber supply chains are the *Sawing*, *Drying*, *Finishing* and *Warehouse agent*. Each one uses operational research algorithms to plan their activities. The overall organization of the information exchanges between agents and the planning process is described in Section 5.2.2.

**Workflow** In order to achieve their goals, these agents need to execute certain tasks, including planning local operations, computing local performance indicators or updating planned inventory data. In the FEPP, these tasks are enclosed within workflows. Basically, a workflow is a series of tasks and business rules.

From an implementation point of view, the agents tested in this study are reactive. Indeed, they listen to events that occur in a simulation. An event represents a change in the environment of an agent (e.g., an agent receives a new demand for a product, the current operational plan has changed, etc.). When an event is triggered, the agent launches all the workflows registered to this event. In turn, events can be triggered by workflows, database operations or conversations between agents. Events can also be parametrized in order to enable the tasks of the workflows to be properly carried out.

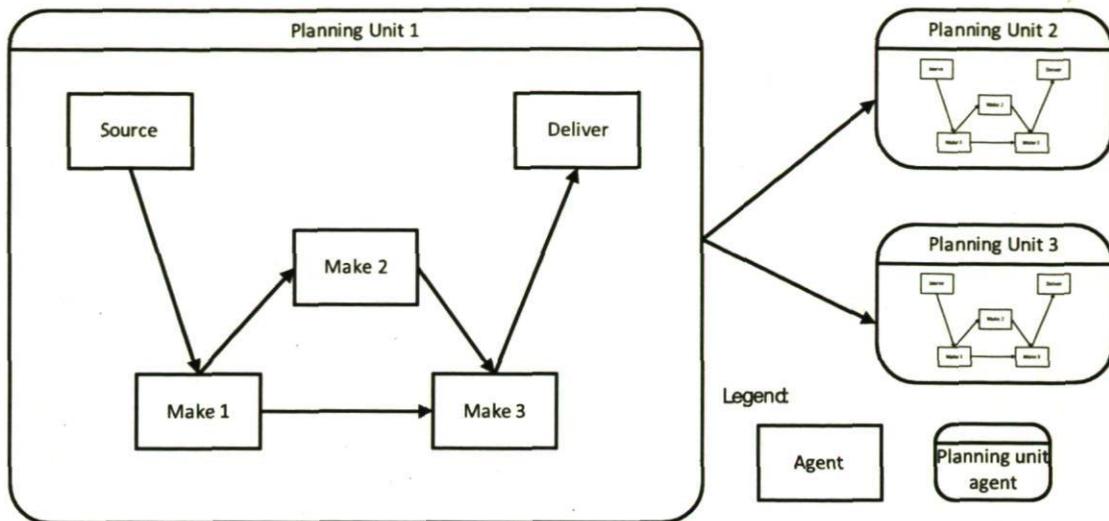


FIG. 5.2: Generic overview of the FEPP

The association of events to workflow is configurable by users in order to change the behaviour of agents.

An example of a workflow is shown in Figure 5.3. First, the agent executing this workflow loads a released plan containing the scheduled frozen jobs of the current active plan. If jobs need to be rescheduled because there is not enough inventory to start a job at the specified date, the agent executes the next task to reschedule the jobs when inventory becomes sufficient. Otherwise, the agent will continue and validate the current manufacturing plan template to ensure that each job can be executed with the specified resources. Next, the agent starts its planning engine to create a new operational plan. This plan is then inserted as a manufacturing plan template into the database. The last step is setting this plan as active to let the agent know that the current production schedule is now obsolete.

**Conversation** In order to coordinate their plans, agents need to communicate with each other. Agents use conversation protocols that specify how to behave during an exchange of messages. These protocols model the role (i.e., sender or receiver) of each agent taking part on the corresponding exchange of messages. Each conversation protocol is composed of two symmetrical protocols (one for each agent). They can be described as a series of states between which particular messages are exchanged. During a given state, the active agent needs to do certain tasks which may in turn lead to a message to be sent. Once a message is sent, the sender agent is generally in a passive state,

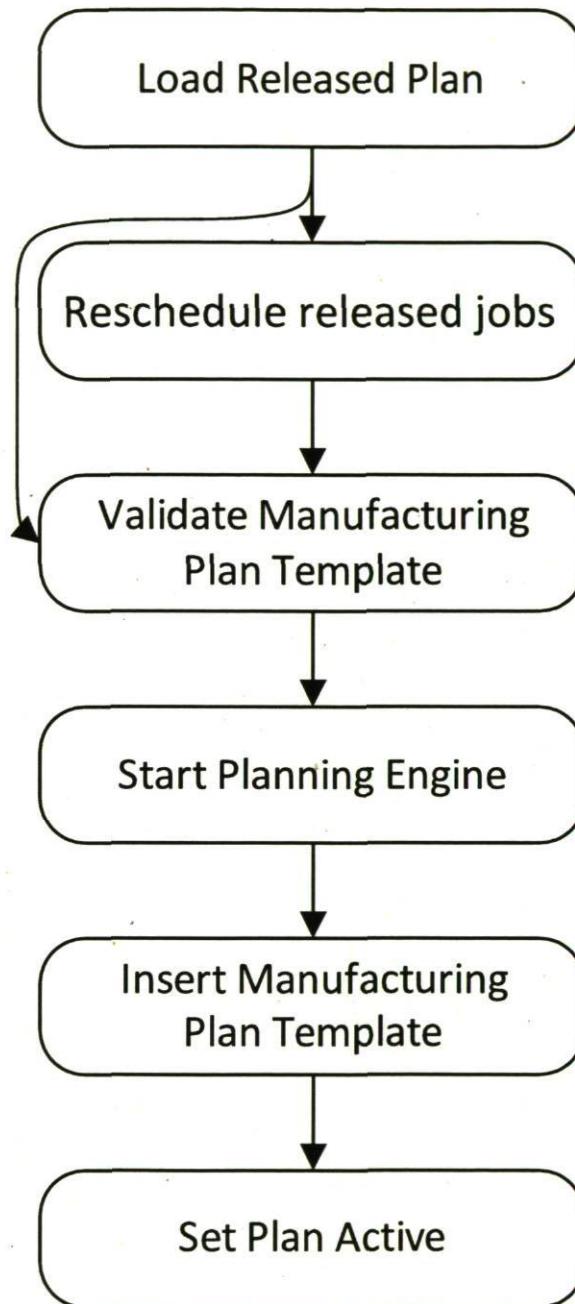


FIG. 5.3: Example of a workflow

listening to new events or expecting an answer message from the other agent.

During a state, as proposed by FIPA<sup>2</sup>, a message can be sent and must contain the following information :

- Sender agent name ;
- Receiver agent name ;
- Conversation protocol name ;
- Conversation protocol version ;
- Content of the message ;
- Synchronous or Asynchronous sending.

The last information specifies to the sender if an answer from the receiver is expected. In such a case, the message will be sent synchronously. During the waiting period, the sender agent can execute a different task in parallel. Otherwise, the sender sends the message and then waits for the next task.

Conversations are triggered inside specific tasks. They can trigger an event in the receiver agent that can in turn start a workflow. An example of a simple conversation protocol can be found in Figure 5.4. This protocol is used by an agent to “ask” another agent if it has a specific product in inventory. In the first state, the sender sends a message to another agent that has the desired products. Depending on the availability of the requested product, the two agents will fall into one of the two following states : “InventoryAnalysisDataRetrieved” if the receiver has these products in inventory or “InventoryAnalysisDataFailure” if not.

**Implementation** The FEPP was developed over a seven-year period using mostly Microsoft .NET C# programming language with a service-oriented architecture (SOA) approach. In order to maximize efficiency and interoperability, some components have been also programmed using C++. Those components are related to the operations planning for the *Sawing*, *Drying*, *Finishing* and *Deliver agent* and use operational research tools such as ILOG CPLEX version 9.0.

The FEPP is composed of 99 conversation protocols to coordinate agents when communicating with each other. Depending on the agent type, agents can use between 5 to 21 workflows to define every possible action they can perform.

For every agent used in a simulation, a unique database is used to store all information created during a simulation. No information is deleted during a simulation. Instead each piece of information is tagged with a property that states whether the current in-

---

<sup>2</sup><http://www.fipa.org/>

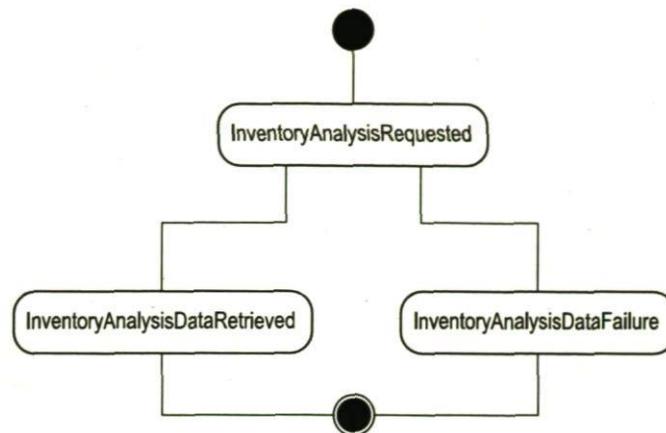


FIG. 5.4: Example of a protocol during a conversation between two agents

formation is active or not. So it is possible to “read” or compute the state (i.e. products inventories, planned operations schedule, performance indicator, etc.) of every agent at any moment during a simulation.

### The Value Creation Network

Lumber supply chains differ from traditional supply chains due to the fact that raw material is heterogeneous. Furthermore, the procurement of eastern Canadian mills being mainly from natural forest through timber licences with the government results in mills having little control over the timber quality they are supplied with. Consequently, the output of a single log transformation process is rather difficult to predict. The mills can use process simulation tools such as Optitek developed by FPInnovations (Goulet, 2006) but this cannot be applied in realtime operations. Eastern Canadian companies deal with this problem by forecasting the production of a large quantities of logs in order to know what quantities of each product can be sold, which is statistically more stable than the production of a single log.

**Production and Distribution Planning Unit** The production and distribution network that was modelled in the FEPP is shown in Figure 5.5. Operations are planned from log reception to final delivery, using all agents from *Source agent* to *Deliver agent* and eventually to *Simulated Customers agent*.

As explained earlier, the role of the *Source agent* is to procure logs for the supply

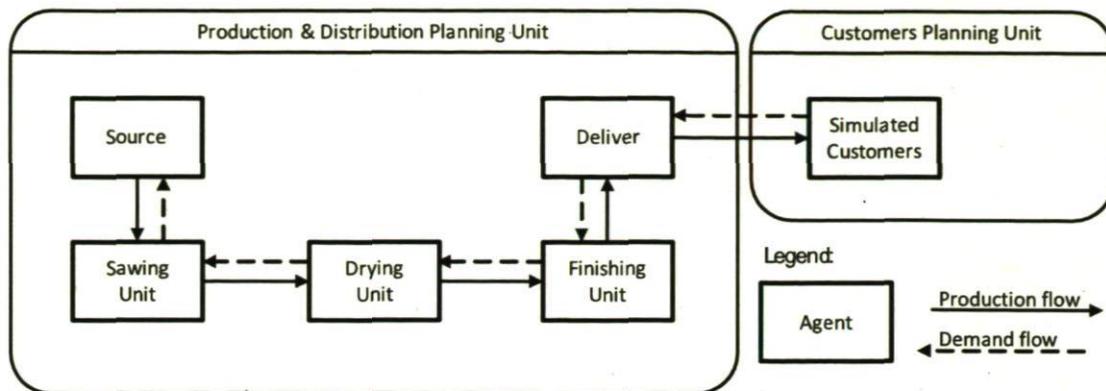


FIG. 5.5: A configuration of the FEPP

chain. These logs are then virtually sent to the *Sawing agent*. By deciding on the volumes and classes of logs to transform during each production shift and the sawing processes to implement with them, logs are planned to be transformed into multiple products : sawdust, chips and lumbers. Bundles of lumbers are then placed into a kiln according to a specific loading pattern. The scheduling of the finishing processes to apply to the dried products is then set by the *Finishing agent*, who determines the final characteristics of the products. The final products are then ready to be sold or delivered to different customers by the *Deliver agent*.

Table 5.1 summarizes the characteristic of the Virtual Lumber Case from the perspective of each organizational unit : products, processors and processes. The sawing unit can process eight different types of logs. It is composed of two sawing lines. For each type of log entering a sawing line, several cutting patterns are possible. The choice of the cutting pattern determines the mix of the output products.

For the drying unit, fifteen products can be dried in one of the seven kiln dryers depending on which loading pattern is selected from the 180 available. This unit is the bottleneck of the network.

Finally, the finishing unit can transform fifteen input products into 45 final products. For each input product a set of alternative processes is available. The algorithm selects the best sequences of processes respecting demands, inventories and resources constraints. The resulting products are transferred to the deliver unit, which is responsible for planning the deliveries to the customer.

The agents manage information about the products, inventory levels, processors and processes in each unit of the network. In addition, the *Sawing*, *Drying* and *Fin-*

	Sawing	Drying	Finishing	Deliver
Number of consumed products	8	15	15	45
Number of products made	15	15	45	45
Processors	1 Sawing Line 8' 1 Sawing Line 8'-16'	5 small kiln dryers 2 big kiln dryers Air dry area	1 Finishing Line	Not applicable
Processes	37	180	15	Not applicable

TAB. 5.1: Definition of sawing, drying, finishing and deliver units

*ishing agents* are able to plan their operations by using respectively, mixed integer programming, constraints programming and heuristics. These models are described in Gaudreault et al. (2009) and were validated weekly using a real industrial case with a sawmill during a one-year period. It is important to note that the drying and finishing models cannot create an optimal solution in a reasonable time. To compensate for this obvious lack, the agent generates a large quantity of feasible solutions, limited by computation time and/or solutions quantity, and picks the best one. Table 5.2 summarizes the planning problem of each agent.

**Processes** In general, a transformation process defines how an operation is performed and what input is required for this particular operation. For a car assembly supply chain, the inputs of the process could be different parts, or platforms of pre-assembled parts and the output would be the ready-to-ship car. In contrast, the lumber industry is characterized by divergent processes where the number of output products is greater than the number of input products. When a log is cut, the output of this operation is sawdust, chips and amounts of lumber of different sizes, which can be desirable in the marketplace or not.

Another particularity is that each log or tree can be cut following a set of different cutting patterns. Each association of logs and cutting patterns becomes a distinct pro-

	<i>Sawing agent</i>	<i>Drying agent</i>	<i>Finishing agent</i>
Objectives	Min. tardiness	Min. tardiness	Min. tardiness
	Max. production value	Max. production value	Max. production value
	Min. costs		Max. resource utilization rate
Processes characteristics	Divergent product flow	Divergent product flow	Divergent product flow
	Co-production	Co-production	Co-production
	Alternative processes Only compatible processes can be executed within the same production shift	Alternative processes	Alternative processes Only compatible processes can be executed within the same production shift
Parameters	Machines capacity calendar	Machines capacity calendar	Machines capacity calendar
	Frozen jobs	Frozen jobs	Frozen jobs
	Maximum sales per product	Operations costs	Solution tree exploration mode
	Inventory cost Raw product cost		Min. production duration by family
Optimization method	MIP	Constraint programming	Heuristic

TAB. 5.2: Definition of sawing, drying and finishing algorithms

cess. In our model, the sawing processes are defined by average of inputs and expected quantities of outputs. Also, the production of these materials uses a machine during a finite time ; therefore, the process is also characterized by an average time-based usage of a processor type. Table 5.3 presents a typical sawing process. The consumption is the input product, in this case 8' spruce log. For each 3.476 m<sup>3</sup> (i.e., a group of logs), a set of output products measured in fbm is produced<sup>3</sup> when this specific process (log class + cutting pattern) is performed.

In fact, there are many possible cutting patterns to choose from to process a log. This leads to the need to select which cutting pattern to use. Figure 5.6 illustrates how each log can be cut using a different cutting pattern. But not every cutting pattern may be used with every log ; some may not be feasible or may not generate enough value to compensate for the cost of the log. Cutting pattern selection changes over time as it is governed by inventory level, demand profile and resource availability.

At the drying unit, each drying process corresponds to a loading pattern. A loading pattern defines how green lumber is loaded into the dry kiln in order to maximize the use of available space. A loading pattern is created by filling out the volume of a dry kiln with bundles of lumber (see Figure 5.7). However, there are constraints that apply to these processes. First, the duration of the drying operation is defined by the thickness of the boards to dry and their moisture content. Moreover, different species of wood require different drying times. Therefore, it is optimal to have a homogeneous "mix" of lumber in the kiln. The drying process defines the control parameters over time (e.g. temperature, pressure). Table 5.4 describes an example of the drying process.

In this unit, there is another kind of drying process which is not carried out in a dry kiln. This process is called air drying and it is mainly used in summer. It occurs in the lumber yard, the duration is counted in weeks, it generates a better quality product and uses less energy to produce. However, air dried products must still go into a kiln dryer for the final step of the process for a smaller duration.

The last step is the finishing unit. At this stage, dried lumber is ready to be planed, sorted and packaged. This operation sets the final attributes to the lumbers (i.e., length, width, thickness and quality). As illustrated in Figure 5.8, this process is divergent (i.e., several final products are produced). Each rough piece of lumber is optimized based on its defects in order to decide whether that piece of lumber needs to be cut in two and where or if trimming can remove a defect on one side or the other in order to increase its market value.

---

<sup>3</sup>1 fbm (foot, board measure) is equal to a board 12" wide x 12" long x 1" thick

Consumption :

Product	Quantity	Unit
8' spruce log	3.476	m <sup>3</sup>

Production :

Product	Quantity	Unit
Chip	1.03	t
Sawdust	0.06	m <sup>3</sup>
Plank	59.59	fbm
2x3 8'	381.5	fbm
2x4 8'	35.99	fbm

Resource utilization :

Product	Duration	Unit
8' Sawing Line	104.88	s

TAB. 5.3: Example of a sawing process

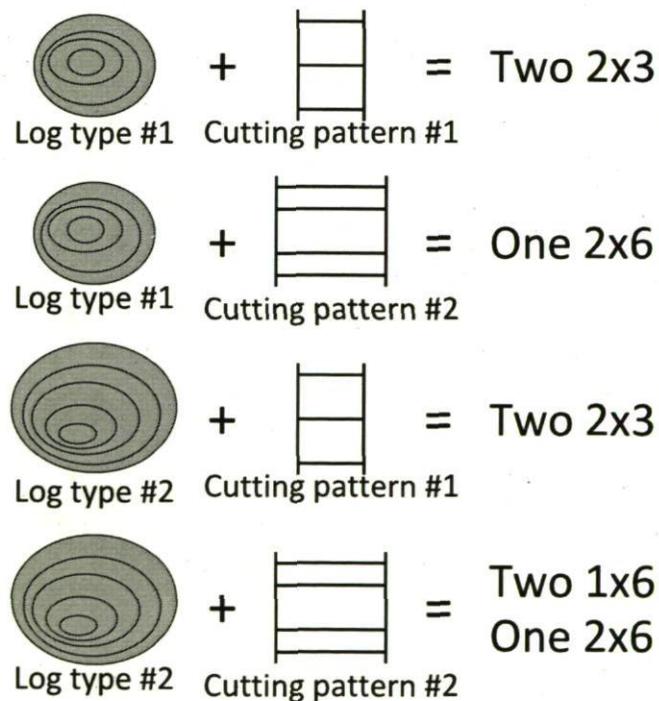


FIG. 5.6: Example of a sawing decision

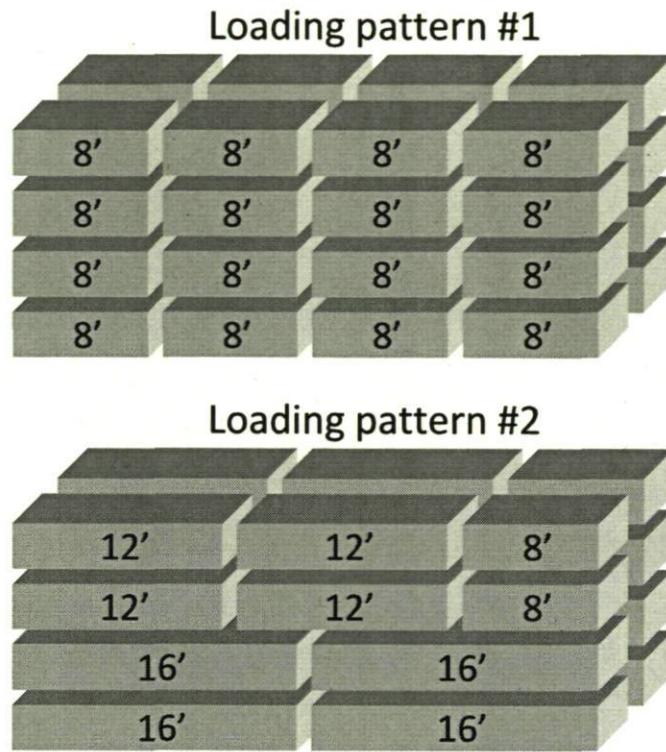


FIG. 5.7: Example of possible loading patterns

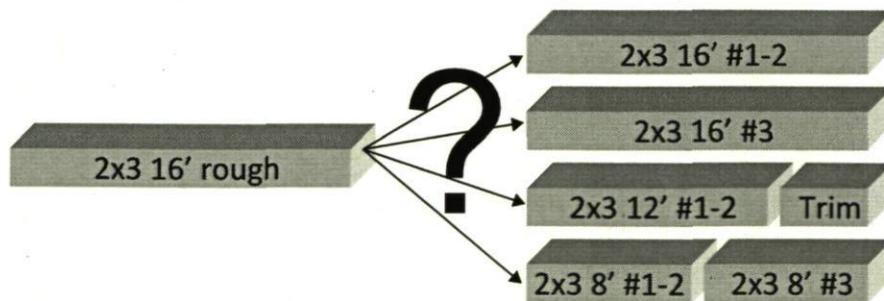


FIG. 5.8: Example of possible outputs for a rough lumber

Consumption :		
Product	Quantity	Unit
2x3 8' Green	31,680	fbm
2x3 10' Green	79,200	fbm
2x3 12' Green	118,800	fbm

Production :		
Product	Quantity	Unit
2x3 8' Dry	31,680	fbm
2x3 10' Dry	79,200	fbm
2x3 12' Dry	118,800	fbm

Resource utilization :		
Product	Duration	Unit
Kiln Dryer #2	216,000	s
	60	h

TAB. 5.4: Example of a drying process

Because a large quantity of lumber is produced every day, it is possible using production reports or simulation data from Optitek to model the output of a process as a percentage that expresses the expected output distribution in terms of lumber final characteristics.

An example of a finishing process is shown in Table 5.5. For a 2x3 12', more than half of the pieces of lumber will conserve the same length (12') and will be of the indicated quality (#1-2, #3 or #4) after the planing process. It is also important to note that the finishing process creates trim.

**Customer Planning Unit** Two types of customer have been considered for the *Simulated Customers agent* : the spot market customer who expresses a one-time need for a specific volume of a particular product, and a contract-based customer who is a regular customer and whose needs are filled within a previously agreed upon contractual setting.

The sales of lumber products can be achieved through the spot market, which is common in commodity industries. In this context, the customer expresses its needs to

## Consumption :

Product	Quantity	Unit
2x3 12'	1	fbm

## Production :

Product	Quantity	Unit
2x3 8' #1-2	0.007125	fbm
2x3 10' #1-2	0.12065	fbm
2x3 10' #3	0.0133	fbm
2x3 10' #4	0.004465	fbm
2x3 12' #1-2	0.665	fbm
2x3 12' #3	0.07505	fbm
2x3 12' #4	0.06365	fbm
Trim	0.05076	fbm

## Resource utilization :

Product	Duration	Unit
Finishing Line	0.22	s

TAB. 5.5: Example of a finishing process

several forest companies sporadically and at random intervals. The customer and chosen supplier then negotiate the final price, the volume and a delivery date. The customer and the producer both exhibit opportunistic behaviours. They have no obligation to one another, other than to fulfil the terms of this unique sale.

A contract involves a relationship and certain expectations on both sides. The contract may specify several requirements such as guarantees of purchase or deliveries, conditions of pricing and payments. It combines repeated deliveries over a set time horizon. In addition, demands from the contract customer occur at relatively regular intervals compared to the spot customer where it is more sporadic by nature.

There is little data available to model these two types of customer behaviours. Generally, companies only keep the information on shipped quantities, not demand information. In particular, if a substitute product is shipped, the original demand information disappears from the database. Therefore, it is very difficult to replicate exactly how customers behave in real life without making assumptions.

To get around this problem we made the assumption that deliveries were the same as demands to statistically model the demand processes just described. For each product, the total demand volume over the planning horizon bounds the summation of the different demands occurring within the planning period. This parameter is based on the historical deliveries of an enterprise in the industry.

The total amount requested was fixed as a percentage of total capacity of the mill in supply-driven production. To compute this capacity, the FEPP was configured in order to maximize the expected value, subject to production and supply constraints, and no demand constraints. From the resulting production figures, the maximum production capacity was derived from the total products volume. The total spot customer demand corresponds to about twice the capacity of the plant.

### 5.2.3 Simulation Components

The simulator consists of three main modules : the FEPP intended to simulate the detailed planning process of the production and distribution network, a customer agent simulating the behaviour of the market, and the simulator components, used to create, analyze and compare different scenarios. The representation of this simulator can be found in Figure 5.1.

## Time Management

Time management is an issue in a distributed simulation because each agent handles local events that follow a global precedence network that, in turn, must be coordinated. Furthermore, because agents use complex planning algorithms that usually take time to produce a complete operations plan, there are two time scales to coordinate : the simulated time that triggers external events such as the expression of a demand, and the real runtime of each agent computing new plans.

In the proposed simulator, the simulated time is coordinated through a centralized clock. All agents use the same clock in order to make sure they all have the same perception of the sequence of simulated events. Thus, there is no risk that an agent is left behind (or races ahead) of others. Another solution often used in the literature is to allow each agent to use its own clock. In this case, messages must contain the date and time of transmission to allow for coordination between agents. However, this latter solution was not practical as the architecture of the simulator did not permit quick changes with a sufficient degree of confidence. Agents could react negatively to a sudden change in time, and would not be able to adapt to a date received if it were "in the past".

The simulation uses discrete events to run (Ross, 2002). The simulator module contains a list of every action to be performed by the agents present in the simulation that enables the simulator to control the simulation. Each action is parametrized by the following characteristics :

- Agent name;
- Action name;
- Specific parameters;
- Trigger time.

The simulator has a list of all agents involved in a simulation and knows their state (working or standby) at all times. Time advances in real time when at least one agent is working. When all agents are in a standby mode, the simulator looks for the next action to achieve, sets the clock ahead accordingly and then asks the agent to follow-through with the targeted action.

When an action is triggered, the simulator delivers instructions to the target agent concerning what to do with specific parameters. Those parameters can contain information on how to perform a specific task or an object. When an agent receives such information, it replies to the simulator by indicating that it is in a working mode and

then performs the requested action. Once the task is completed, the agent reports to the simulator and returns to a standby mode.

The action carried out by an agent can trigger an action by another agent using a conversation. The first agent sends a message to the second. The latter receives the message and adds a request for the new action in the simulator actions list. The action may be triggered immediately or later depending on the needs of the requesting agent.

### Key Performance Indicator

Key performance indicators are a necessity to determine which scenario is better. The first s that comes to mind would be to use financial indicator. The challenge with this approach is that there are a lot of imponderables (e.g., how to quantify a continuous refusal of sales or systematic late deliveries). These impacts are very difficult to calculate for a supply chain, even in real-life, while it is very easy to understand that a enterprise with a poor service level will incite its customers to look elsewhere.

In order to cope with these flaws, an indicator based on the volume of non-discounted sales will be used as shown in Equation 5.1. A non-discounted sale is a single demand that is planned to be fulfilled on time without using a substitute product as is done in this industry. The higher the total volume of non-discounted sales is, the better the value creation network is able to fill the needs of its customers.

$$\sum_{\text{Demand} \in \text{DemandsFulfilledOnTime}} \text{Volume}_{\text{Demand}} \quad (5.1)$$

To counteract the obvious case of accepting all demands and planning big delays in the fulfilment of these demands, two more indicators will be used to measure the service level offered to the customer.

The first one is the fillrate. It evaluates the number of demands that will be fulfilled on time (see Equation 5.2) expressed in percentage. Even though the customer will only accept a demand if it is on time, the value creation network has a flexibility to change

a scheduled delivery in case a more important (higher value) demand arrives.

$$\frac{\sum_{\text{Demand} \in \text{DemandsFulfilledOnTime}} \text{Demand}}{\sum_{\text{Demand} \in \text{ConfirmedDemands}} \text{Demand}} \quad (5.2)$$

The last one is the backorder. This indicator evaluates how long a demand will remain in backorder when not fulfilled on-time (see Equation 5.3).

$$\frac{\sum_{\text{Demand} \in \text{LateConfirmedDemands}} \text{BOLateness}_{\text{Demand}}}{\sum_{\text{Demand} \in \text{LateConfirmedDemands}} \text{Demand}} \quad (5.3)$$

### Random Number Generator

A single *Simulated Customers agent* emulates the behaviour of multiple customers. It is responsible for generating the characteristics of all demands that will be used in the simulation. This agent is parametrized using random variables that represent different ordering aspects.

The rather large amount of random numbers necessary for this kind of simulation implies the need for a rapid, robust and malleable generator capable of serving the needs of different models. The uniform random number generator used was the Mersenne Twister (Matsumoto and Nishimura, 1998). This generator can produce random numbers with a very large cycle (the quantity of generated number before it loops to the first one) without slowing down the performance.

However, numbers that follow a uniform distribution are not useful to establish customer demands. Therefore, it is necessary to transform the output of the generator into numbers that can follow different types of distribution, such as triangular, normal or exponential (Ross, 1993).

The method used in this application is simple but effective. The first step is to transform the density function of the desired distribution into a discrete form. For example, to generate a number following a normal distribution, a graphic representation of the distribution is divided by the number of intervals. Each interval is associated with a probability which is calculated by the area under the curve divided by the total

area. Thus, by choosing a uniform number in the interval  $[0, 1]$ , it is possible to find the corresponding value using the cumulative weight of the interval. An example is provided in Figure 5.9; if the chosen number is 0.47, then it is the value associated with the second interval that will be selected. Of course, it is always possible to approximate the areas under the curve if the number of intervals tends to be high. From this point, a random number will correspond to a random number following the desired distribution.

### Customer Generation Model

Instead of generating demands during the simulation, the *Simulated Customers agent* creates them before the start of a simulation. This approach facilitates the analysis, transformation and replication of demands without going through a whole simulation run. Furthermore, the validation of a modelled customer is easier to do since the simulation does not have an impact on the generation of demands. This generation is based on the demand modelling defined by Chang and Makatsoris (2001). Consequently, it is necessary to add to these pre-generated demands some information that will be used by the agent to “hide” futures demands.

**Spot-based Demand** The general goal is to represent the behaviour of a typical sporadic customer. In order to do this, a demand process (i.e., the process that a demand would go through) was first developed. According to this demand process, the customer calls the sales department in order to know if a quantity of product is available for a given date. Then, if the supplier replies with a positive answer, the customer confirms its need, which becomes a formal order. Otherwise, the assumption is made that the customer withdraws its demand and chooses another suppliers to fulfil the demand.

In summary, for each customer-supplier-product relationship, the agent generates a list of demands which have several characteristics :

- Date of delivery (when the customer will want the product);
- Quantity;
- Effective Date (when the customer will ask for a demand);
- Status (planned, confirmed or removed and initially set to planned).

The demand generation algorithm is illustrated in Figure 5.10. The first step of the algorithm is to generate a random number that corresponds to the total amount that will be demanded for this customer-supplier-product relationship under this behaviour over the whole simulation horizon. As long as there is quantity left from this total amount, the algorithm creates a new demand. Each demand created will be characterized by a random quantity, a delivery date influenced by the seasonality of the desired product

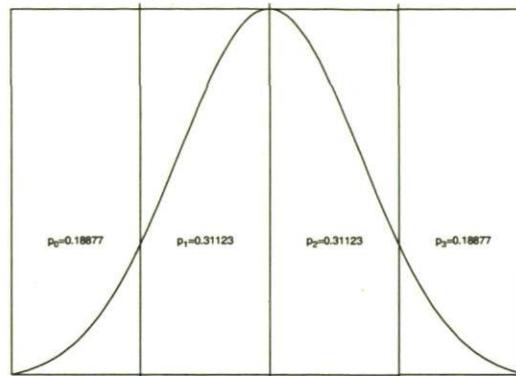


FIG. 5.9: Example of a normal curve

and a lead time that will be drawn to create the effective date by subtracting it from the delivery date. The effective date corresponds to the date when the customer sends the demand (e.g., the date of the call in the demand process). This information is crucial for the simulation process as the demand will be announced to the supplier agent only when the clock reaches the effective date of the demand.

**Contract-based Demand** The contract-based customer, as opposed to the spot market customer, cannot cancel a demand if it is not filled in time. Each demand must be filled in chronological order and the supplier is entitled to penalties in the case of late fulfilment. The assumption is made that an agreement binds the supplier to the customer and the supplier should be able to meet the demands of its customers or pay penalties.

The generation process of contract-based customer demands also differs from the process used for spot market customers. The first part of the algorithm, as outlined in Figure 5.11, is represented by the first three boxes which are used to draw up a list of dates that will represent the dates when demand must be fulfilled. From the start date of the simulation, the list is completed by drawing an interval with the next demand until the expected date of a demand is no longer within the time horizon of the simulation.

Once this list is complete, a global quantity will be drawn and distributed using seasonality of the product on the randomly established delivery dates. For each demand date in the list, the algorithm will assign a percentage of the total volume representing the “weight” of the date in the seasonal curve of total weightings.

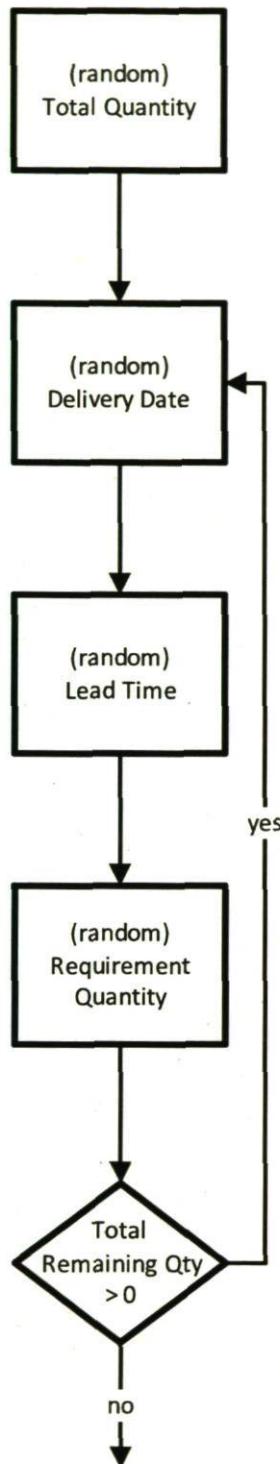


FIG. 5.10: Spot demands generation algorithm

The last step is to introduce in these demand figures a certain degree of “noise” that represents the numerous uncontrolled variations of demand in the market. To do this, we introduce a Gaussian noise, centred at an average of one and a standard deviation representing the degree of variation, which will multiply the quantity.

### Customer Behaviour Model

During a simulation, the Simulated Customer agent adopts certain behaviours to better mimics a real customer. The model uses demand data, generated from the actions described in the previous section (5.2.3).

**Spot Customer** At the beginning of a simulation, all demands that must be sent before the start date of the simulation, those that the effective date is before the start date, are assembled into a demand plan. A demand plan is a group of demands sent to a supplier agent. This demand plan is the initial plan that is sent to the *Deliver agent* of the supplier planning unit (Figure 5.12). According to its planning strategies, the Production and Distribution Network (see Figure 5.5) will conceive a supply plan to the best of its abilities and will try to satisfy all demands.

In turn, the customer reacts according to the “quality” of the proposed supply plan. For each demand, the customer calculates the date when the current demand is completely satisfied. If the date is later than the required date, the customer will remove this demand from the list. The supply allocated to the cancelled demand will be reallocated to forthcoming demands. On the contrary, if the date is acceptable, the demand will change status from “proposed” to “confirmed”. This indicates that both the supplier and the customer are aware of this demand and the supplier must do everything possible to maintain this planned delivery date.

At this point, if the simulation run is not completed, the Simulated Customer agent creates a new demand plan. This plan contains the confirmed demands from the previous plan generated during the previous planning cycle. Furthermore, any new demands for which the effective date falls before the current simulation date is added to this demand plan.

**Contract Customer** The planning horizon is divided into three subhorizons : frozen, evolving and provisional. These subhorizons are used to introduce perturbations in the demand plan using the principle that the farther the demand is in the time horizon, the

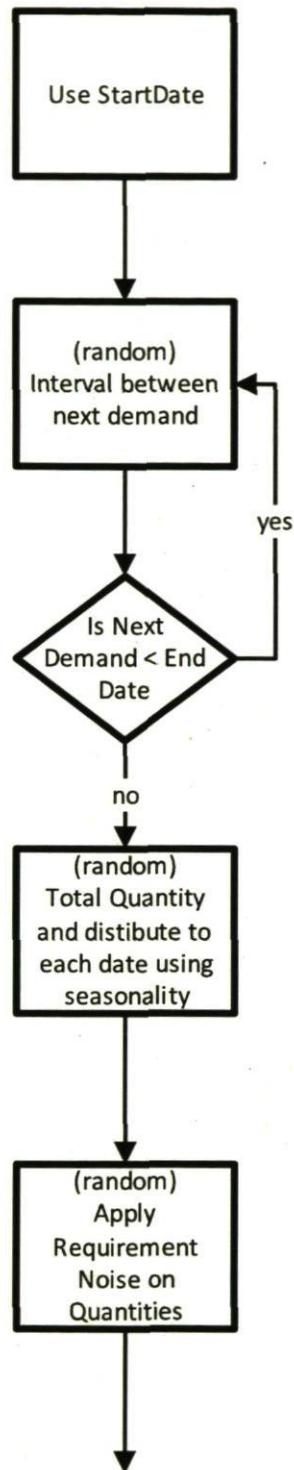


FIG. 5.11: Contract demands generation algorithm

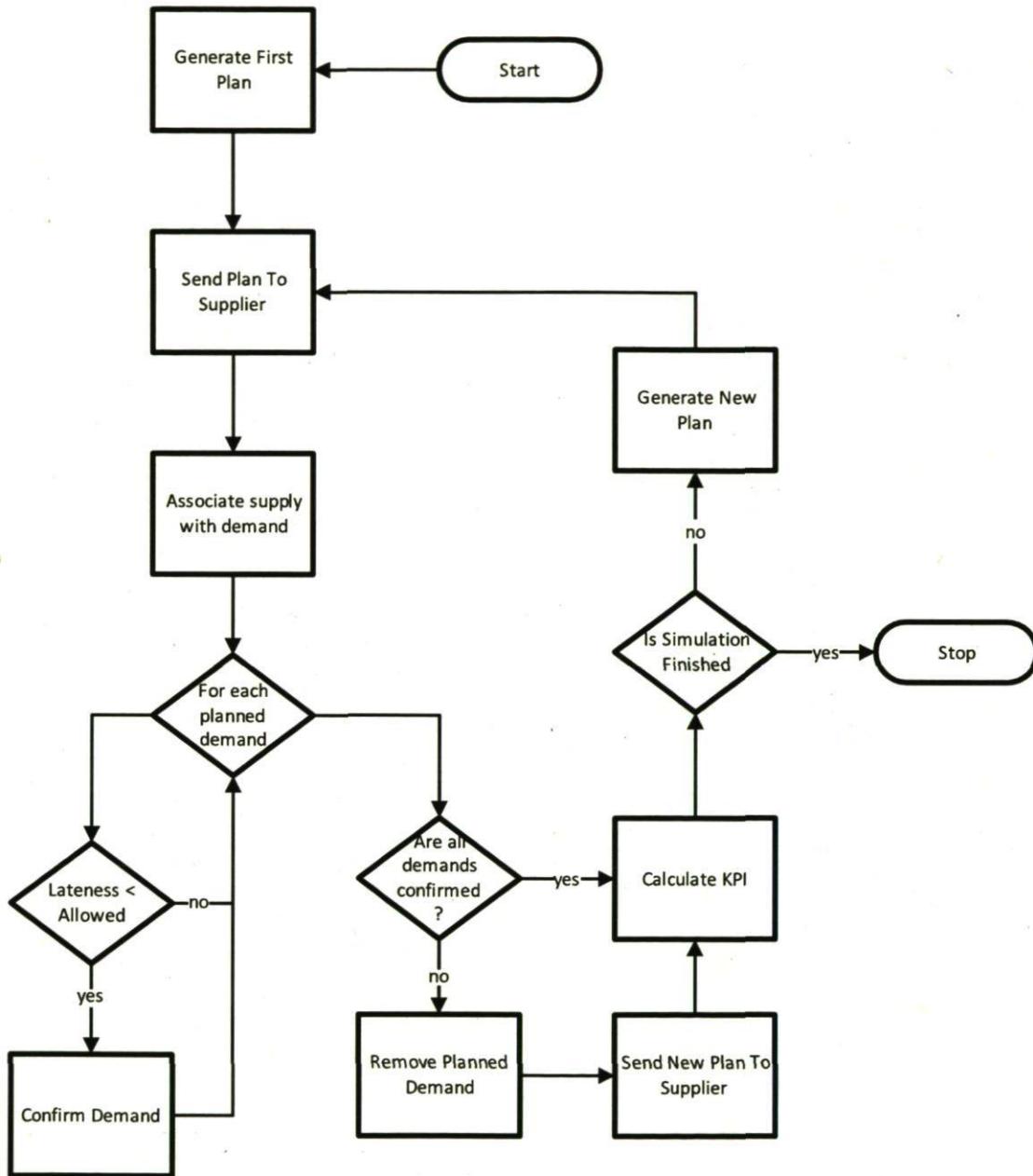


FIG. 5.12: Behaviour of Spot Customer in a simulation

greater its uncertainty is. In the frozen horizon, which starts with the current simulation date, demands are fixed and cannot be changed for any reason. At the other end of the planning horizon, the provisional horizon of the demand plan can change completely since there are no restrictions to changes. Between these two horizons, the quantity of each demand may change, but the increase or the decrease is bounded.

During the initialization procedure of the simulation, the Simulated Customer agent creates an empty initial demand plan for the contract customer. To this plan, the customer adds demands that fall into the planning horizon. This plan is then sent to the Production and Distribution Network which will try to meet the needs (Figure 5.13).

Then, if the simulation is not finished, a copy of the last plan is made. This operation makes it possible to keep information about previous plans. The horizons are adjusted to the current simulation date in the copied plan and new demands that fall into these horizons are added. Existing demands present in the evolving and provisional horizons are modified with respect to their bounds.

#### 5.2.4 Experiment

The objectives of this paper are to evaluate the impacts of different planning strategies in a supply chain and simulate them using a multi-agent simulator integrating an APS. In order to do this, two experiments were developed to evaluate and compare different scenarios using a total of 13 agents representing business units in a lumber value creation network and essential agents needed by the FEPP. The goal of these experiments is to observe the impact of a demand-driven approach in a lumber supply chain. In other words, these experiments propose to study the effects on a supply chain when a company plans its operations taking into account customer demands compared to a supply chain which doesn't, as is often the case in a commodity based industry. In such a case, the company aims to produce higher value products without considering actual demand. It is only afterward that they balance demand with supply using substitutions, discounting or inventory strategies.

In order to achieve a long horizon simulation, the simulator uses the rolling horizon concept. This is the main difference with Cid Yáñez et al. (2008). From a given date, the planning is done for four weeks. After every agent has completed all of their active taskflows, the simulator sets the clock ahead one or two weeks depending on the experiment (see Table 5.6). For each agent, the new on-hand inventory condition is computed using the inventory at the former start date, plus the planned production

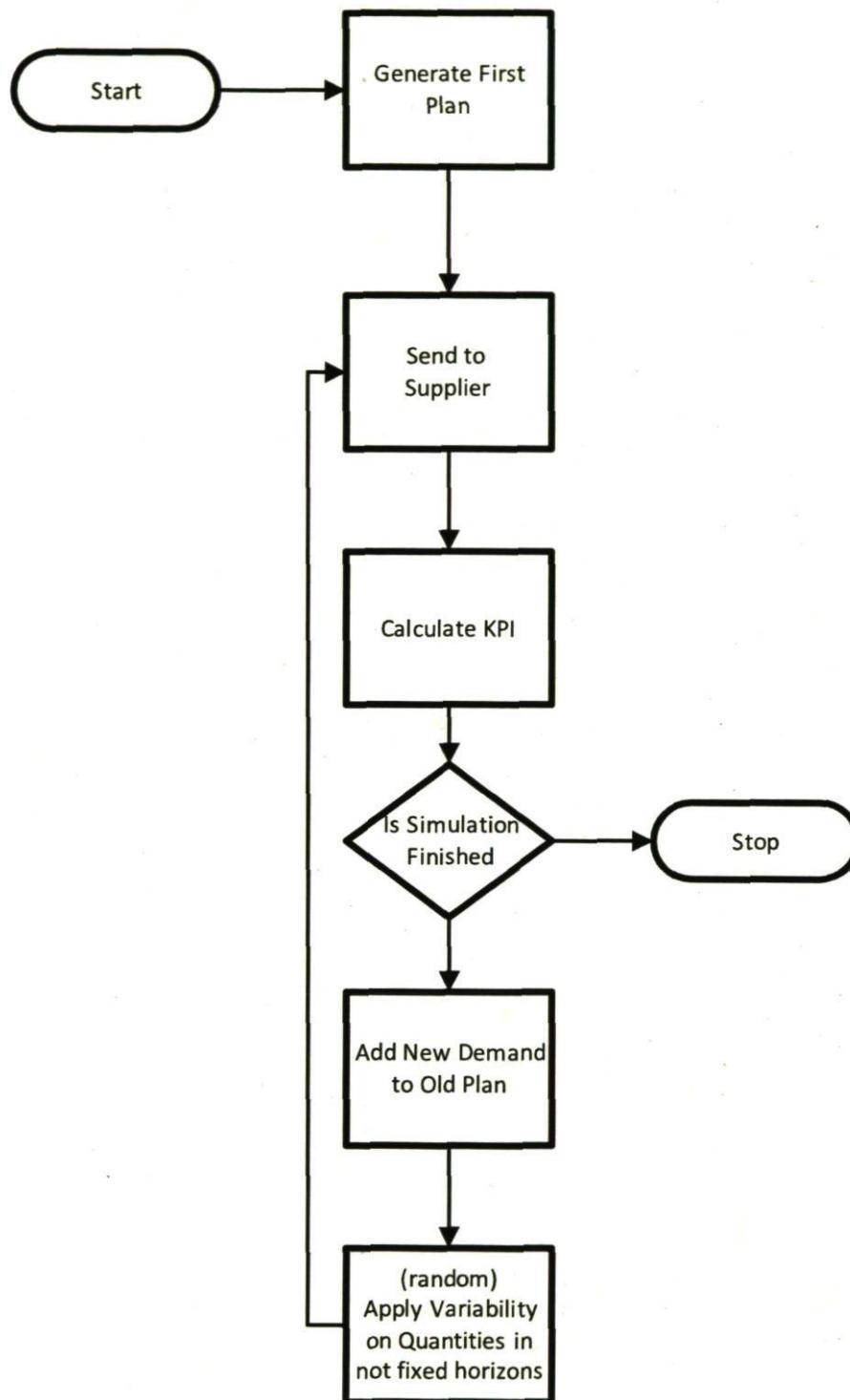


FIG. 5.13: Behaviour of Contract Customer in a simulation

of the previous period (it is assumed that production happened exactly as planned), minus the quantity shipped to the next agent in the supply chain.

For these experiments, a six-month horizon was chosen. Over the course of a simulation, each agent will need to perform the local planning of its operations. The total number of times it happens depends on the strategy used in the experiment and can vary from 12 to 48 during the simulation horizon.

### First experiment

In this experiment, the spot customer is used in order to anticipate the performance variations of a lumber supply chain when demands are propagated throughout the network (demand-driven) versus when the production is pushed (supply-driven).

The supply-driven approach is traditionally the one used in the North American lumber industry. In a supply-driven approach, the corporate production planner sets goals for each production facility in the form of production mix and yield targets over a given time period. In each facility, the local production planner uses these targets in order to set operational plans. Even if a demand variation occurs in the market, the production will stay the same and may only change the next time the corporate planner revises these targets.

In contrast, demand-driven occurs when the planner takes customer demands into account explicitly. This approach raises planning challenges especially in a context of divergent production processes. It is indeed extremely difficult to create manually a production plan in order to meet all customer demands. From the point of view of the Production and Distribution network, the solution to this problem is to find a compromise between all the demands from the customer and the available log supplies in order to create an operational plan that respects the production constraints.

In this experiment, the Virtual Lumber case was used and the two different planning strategies were tested. In the first one, the production planning unit takes a supply-driven approach. Only the *Deliver agent* knows the exact customer demands. The sales department uses a strategy called Available-to-Promise (ATP) which is the most common approach in the lumber industry. Its motive is to sell the lumber produced by the mill. This strategy is best explained in Ervolina et al. (2006). It is used as the reference case in this experiment.

The second strategy tested is the demand-driven approach. Here, the different agents

optimize their local production plans according to the customer demands and anticipate future demands by using the remaining capacity to produce the expected higher value products. In this approach, before giving a response to a customer demand, the agents verify that the current demand can be fulfilled by making changes in the production plan or changing the allocation of the production. All agents are called upon to validate or plan their operations again in order to find the best synchronized plan to meet final customer demands.

### Second experiment

The idea in the first experiment was that a demand-driven approach was better to serve the customer but the results were not conclusive. So, a second experiment was necessary and it is derived from the first. It uses the same two planning strategies (supply-driven and demand-driven) and integrates a new one. This new strategy involves answering customer demand with on-hand inventory the same way as the supply-driven approach. But, when the customer confirms a demand (see Section 5.2.3 for more information), this demand is used to influence the production planning like the demand-driven approach.

This filtered demand-driven approach (only confirmed demands are propagated through the supply chain) should better serve the customer than the demand-driven approach by reducing backorder. Also, by using filtered demands propagated through the value creation network, it should help stabilize the production while influencing this planning process.

### 5.2.5 Results

The results for the first experiment can be seen in Figure 5.14a. The results are computed on the basis of non-discounted sales over 10 simulation replications. These

Experiment	Strategies used	Planning interval
First	Supply-driven, Demand-driven	2 weeks
Second	Supply-driven, Demand-driven, Filtered Demand-driven	1 week

TAB. 5.6: Experiments summary

sales correspond to exact needs expressed by the customer as described in Section 5.2.3. On Figure 5.14a, it is possible to see that using a demand-driven approach increases the volume of non-discounted sales.

But this increase of sales puts more pressure on the supply chain and this leads to a worse service level for the customer. In fact, the fillrate decreases, which leads to a greater number of demands fulfilled late and a longer time in backorder as can be seen with the backorder indicator.

In theory, a demand-driven approach should be better adapted to fulfil customer demands. The problem in this experiment might come from the delay between two planning cycles. For example, if a demand is planned to be fulfilled late, the next chance it would get to be on time would be in two weeks. To cope with this, more frequent planning would provide a better way to increase sales while maintaining a good service level.

That was the premise of the second experiment. And as can be seen on Figure 5.14b, a better control of the planning process increases the volume of sales while maintaining a relatively good service level over 12 simulation replications.

Moreover, by using a filtered demand-driven approach, it is possible to increase the total volume of sales while increasing the service level. This can be explained by the fact that the supply chain is not influenced by undesired demands compared to the demand-driven approach. In the latter strategy, all demands influence the planning process. Many of these demands will be removed by the customer and contribute to create some sort of noise in the supply chain planning process when using the demand-driven approach. When using the filtered demand-driven approach, the *Deliver agent* acts as a demands filter for the whole supply chain and helps improve all the indicators of the whole value creation network.

However, these results should not be interpreted as a recommendation for the global lumber industry. Each sawmill is different and would probably achieve a different result for this experiment. Moreover, it is possible to use a multi-agent simulation to analyze such a tactical problem, and consequently, better analyze its impacts in a value creation network and be in better position to make a decision.

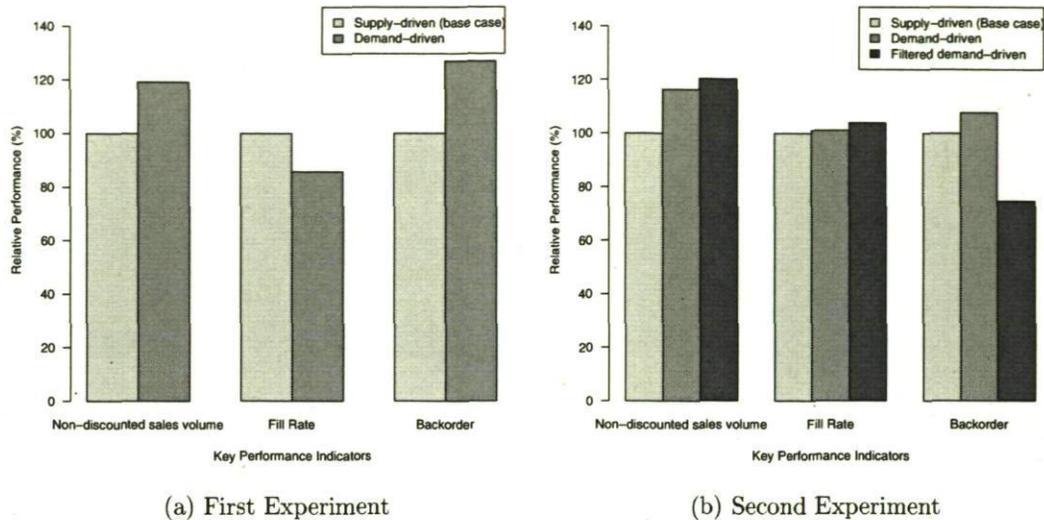


FIG. 5.14: Experiments Results

### 5.2.6 Concluding Remarks

As demonstrated in the previous section, it is possible to use the FEPP as a simulation framework to conduct robust experiments in a variety of fields. This is a solid and very versatile platform that can accommodate studies of revenue management, planning problems, strategic decision and forest planning.

To demonstrate the simulation capabilities of the FEPP, another experiment is available in Lemieux et al. (2008) where the contract customer is present. The objective of this experiment was to find the optimal proportion of contracts a value creation network can accept without decreasing the total sale value of all its customers.

Furthermore, the sawmills used in these studies can in fact be modelled after real sawmills. This creates an opportunity to study strategic questions without impacting the day-to-day operations. This would enable decision makers to simulate different scenarios before making a binding decision, resulting in a better informed decision.

Consequently, future work will include the validation of the results presented in this paper. This objective will need an increased number of replications of the simulations described to ensure a statistical quality of the result obtained. A system is being developed to manage the simulations. This system will be able to launch a predefined number of simulations in parallel and will incorporate a service to gather the resulting

key performance indicators of a simulation. Once a simulation is complete, it will start a new one without the need of interaction with the user.

## Acknowledgements

This work was funded by the FORAC Research Consortium and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). The authors would also like to acknowledge the impressive work of many FORAC research assistants and students who have worked on developing the FEPP over the years.

## References

- Balci, O., 1986. Credibility assessment of simulation results. In : Proceedings of the 18th conference on Winter simulation. ACM Press New York, NY, USA, pp. 38–44.
- Chang, Y., Makatsoris, H., 2001. Supply chain modeling using simulation. *International Journal of Simulation* 2 (1), 24–30.
- Cid Yáñez, F., Frayret, J.-M., Léger, F., Rousseau, A., 2009. Agent-based simulation and analysis of demand-driven production strategies in the timber industry. *International Journal of Production Research* vol., 47, no. 22, pp. 6295–6319.
- D'Amours, S., Frayret, J.-M., Rousseau, A., Harvey, S., Plamondon, P., Forget, P., 2006. IFIP International Federation for Information Processing, shen, w. Edition. Vol. 220. Boston : Springer, Ch. Information Technology for Balanced Manufacturing Systems, pp. 17–26.
- D'Amours, S., Rönnqvist, M., Weintraub, A., 2007. Using operational research for supply chain planning in the forest products industry, CIRRELT Working paper #CIRRELT-2007-52, to appear in INFOR.
- Ervolina, T., Ettl, M., Lee, Y., Peters, D., 2006. Simulating order fulfillment with product substitutions in an assemble-to-order supply chain. In : Proceedings of the 37th conference on Winter simulation. Winter Simulation Conference, pp. 2012–2020.
- Forget, P., D'Amours, S., Frayret, J.-M., 2006. IFIP International Federation for In-

formation Processing, shen, w. Edition. Vol. 220. Boston : Springer, Ch. Information Technology for Balanced Manufacturing Systems, pp. 89–98.

Frayret, J.-M., D'Amours, S., Rousseau, A., Harvey, S., Gaudreault, J., 2007. Agent-based supply-chain planning in the forest products industry. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 19 (4), 358–391.

Gaudreault, J., Forget, P., Frayret, J.-M., Rousseau, A., D'Amours, S., 2009. Distributed operations planning in the lumber supply chain : Models and coordination, CIRRELT Working paper #CIRRELT-2009-07.

Goulet, P., 2006. Optitek : Users Manual, Record : #E-4130.

Gronalt, M., Rauch, P., 2008. Vendor managed inventory in wood processing industries-a case study. *SILVA FENNICA* 42 (1), 101.

Lemieux, S., Damours, S., Gaudreault, J., Frayret, J.-M., 2008. Intégration d'outils APS dans une simulation multi-agent : Une application à l'industrie du bois d'œuvre. In : *Proceeding of the 7e Conférence Internationale de Modélisation et Simulation*. pp. 708–715.

Matsumoto, M., Nishimura, T., 1998. Mersenne twister : a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)* 8 (1), 3–30.

Petrovic, D., Roy, R., Petrovic, R., 1998. Modelling and simulation of a supply chain in an uncertain environment. *European Journal of Operational Research* 109 (2), 299–309.

Robinson, S., 2002. General concepts of quality for discrete-event simulation. *European Journal of Operational Research* 138 (1), 103–117.

Rönnqvist, M., 2003. Optimization in forestry. *Mathematical Programming* 97 (1), 267–284.

Ross, S. M., 1993. *Introduction to Probability Models*, 5th Edition. San Diego : Academic Press.

Ross, S. M., 2002. *Simulation*, 3rd Edition. Academic Press.

Sargent, R. 2005. Verification and validation of simulation models. In : *Proceedings of*

the 37th conference on Winter Simulation. Winter Simulation Conference, pp. 130–143

Schneeweiss, C., 2003. Distributed Decision Making, 2nd Edition. Springer.

Stadtler, H., 2005. Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges. *European Journal of Operational Research* 163 (3), 575–588.

# Chapitre 6

## Conclusion

Ce dernier chapitre récapitule les différentes contributions apportées au cours de ce mémoire et continue sur les pistes de recherche à étudier dans le futur.

### 6.1 Contributions

La première contribution d'importance de cette maîtrise est au niveau du développement d'un agent simulant le comportement de clients dans le cadre de la PEPF. Il permet d'étudier différents scénarios en offrant la possibilité de les comparer entre eux.

Par contre, les contributions de ce mémoire ne se situent pas simplement sur le développement de modules informatiques. Elles se situent également sur l'élaboration d'un cas virtuel complexe qui est utilisé dans plusieurs autres travaux (Forget et al, 2008a,b; de Santa-Eulalia, 2009; de Santa-Eulalia et al, 2009).

#### 6.1.1 Simulateur avec un APS

La première contribution d'importance est l'évolution de la Plateforme Expérimentale de Planification FORAC vers un environnement de simulation. En effet, plusieurs composantes critiques ont été implantées par l'auteur pour permettre l'utilisation de cet outil APS dans un mode virtuel.

De plus, il a été nécessaire d'ajouter un nouvel agent afin de pouvoir modéliser des

scénarios de simulation. En effet, ce nouvel agent permet de simuler les comportements de différents clients qui seront utilisés lors de simulations de façon à être en mesure de comparer des stratégies de planification, des méthodes de réponse aux clients, etc.

### 6.1.2 Virtual Lumber Case

Outre ce développement de simulateur, il aurait été impossible de faire des simulations sans un cas virtuel. Ce cas a été développé dans le cadre de mes travaux et correspond à une contribution importante en tant que telle. De plus, toute la démarche de validation du cas a été faite durant le développement tel que proposé par ? Conséquemment, plusieurs personnes ont profité de ces travaux sans avoir à tout refaire la validation en profondeur.

En effet, il est souvent très long et ardu de modéliser une usine. Les données sont souvent disparates, incomplètes ou inexistantes. La crise actuelle fait en sorte que les gestionnaires sont très occupés et peu disponibles à chercher et transmettre ces données.

De plus, très souvent, ces données sont confidentielles et les dirigeants d'entreprises sont très réticents à divulguer ces informations à leurs concurrents. Les avantages compétitifs sont, pour la plupart du temps, ce qui fait en sorte qu'une usine puisse rester ouverte en ces temps de crise. C'est pourquoi un cas virtuel bien documenter représente une contribution et demeure un objet important de la recherche.

## 6.2 Projets futurs

Afin de poursuivre ces recherches, il est inévitable de développer un agent représentant la forêt. Ce nouvel agent permettrait de modéliser l'approvisionnement en forêt. Ainsi, toute la chaîne serait modélisée et augmenterait beaucoup les capacités de recherche.

De plus, des méthodes tirées de la simulation stochastique pourraient être incorporées dans la PEPF. Par exemple, une perturbation de la production pourrait être implantée pour simuler la nature hétérogène de la matière forestière et l'imprédictabilité des bris de machines. Ainsi, il serait possible de mieux représenter le comportement dans une usine réelle.

### 6.3 Conclusion finale

La simulation est un domaine en effervescence et peut faire partie de la solution afin d'aider l'industrie forestière à sortir de la crise qu'elle vit depuis quelques années. Ainsi, il est possible de fournir des pistes de solutions à cette industrie en analysant les pratiques courantes afin de proposer des changements dans les méthodes qui tiennent compte de nouvelles réalités.

# Bibliographie

- Balci, O. 1986, «Credibility assessment of simulation results», Tech. Rep., Departement of Computer Science at Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Cid Yáñez, F., J.-M. Frayret, F. Léger and A. Rousseau. 2009, «Agent-based simulation and analysis of demand-driven production strategies in the timber industry», *International Journal of Production Research*, vol. 47, no. 22, pp. 6295–6319.
- Forget, P., S. D'Amours, J.-M. Frayret and J. Gaudreault. 2008a, «Performance analysis of multi-behaviour agents for supply chain planning», CIRRELT Working Paper #CIRRELT-2008-43.
- Forget, P., T. Monteiro, S. D'Amours and J.-M. Frayret. 2008b, «Collaborative agent-based negotiation in supply chain planning», in *13th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications and Practice*. Las Vegas, September 7-10.
- Frayret, J.-M., S. D'Amours, A. Rousseau, S. Harvey and J. Gaudreault. 2007, «Agent-based supply-chain planning in the forest products industry», *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 358–391.
- Fu, Y., R. Piplani, R. de Souza and J. Wu. 2000, «Agent-based simulation applications : multi-agent enabled modeling and simulation towards collaborative inventory management in supply chains», in *Proceedings of the 32nd conference on Winter simulation*, Society for Computer Simulation International San Diego, CA, USA, pp. 1763–1771.
- Galland, S., F. Grimaud, P. Beaune and J.-P. Campagne. 2005, *Supply Chain Optimization*, chap. Simulation of Distributed Industrial Systems, Springer, pp. 277–287. URL <http://www.springerlink.com/content/u81j84604350n36m>.
- García-Flores, R. and X. Z. Wang. 2002, «A multi-agent system for chemical supply chain simulation and management support», *OR Spectrum*, vol. 24, no. 3, pp. 343–370.

- Julka, N., R. Srinivasan and I. Karimi. 2002, «Agent-based supply chain management—1 : framework», *Computers and Chemical Engineering*, vol. 26, no. 12, pp. 1755–1769.
- Labarthe, O., A. Ferrarini, B. Espinasse and B. Montreuil. 2006, «Multi-agent modelling for simulation of customer-centric Supply Chain», *International Journal of Simulation and Process Modeling*, vol. 2, no. 3, pp. 150–163.
- Law, A. M. and M. G. McComas. 1991, «Secrets of successful simulation studies», in *Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference*.
- Marsaglia, G. 1985, «A current view of random number generator», in *Computer Science and Statistics : Proceedings of the Sixteenth Symposium on The Interface*, Elsevier, pp. 3–10.
- Marsaglia, G. and A. Zaman. 1991, «A new class of random number generators», *The Annals of Applied Probability*, vol. 1, no. 3, pp. 462–480.
- Matsumoto, M. and T. Nishimura. 1998, «Mersenne twister : A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator», *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, vol. 8, no. 1, pp. 3–30.
- Meyr, H., M. Wagner and J. Rohde. 2002, *Supply Chain Management and Advanced Planning—Concepts, Models, Software and Case Studies*, chap. Structure of Advanced Planning Systems, 2nd edn., Springer, pp. 99–104.
- Puigjaner, L. and G. Guillén-Gosálbez. 2008, «Towards an integrated framework for supply chain management in the batch chemical process industry», *Computers and Chemical Engineering*, vol. 32, no. 4-5, pp. 650–670.
- Russell, S., P. Norvig, J. Canny, J. Malik and D. Edwards. 2003, *Artificial intelligence : a modern approach*, 2nd edn., Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.
- de Santa-Eulalia, L.-A. 2009, *Agent-Based Simulations for Advanced Supply Chain Planning : A Methodological Framework for Requirement Analysis and Deployment*, Ph.D. thesis, Université Laval.
- de Santa-Eulalia, L.-A., D. Ait-Kadi, S. D'Amours, J.-M. Frayret and S. Lemieux. 2009, «Evaluating tactical planning and control policies for a softwood lumber supply chain through agent-based simulations», in *IESM'2009 International Conference on Industrial Engineering and System Management*. Montréal, May 13 - 15, (submitted).
- de Santa-Eulalia, L.-A., J.-M. Frayret and S. D'Amours. 2008, «Essay on conceptual modeling, analysis and illustration of agent-based simulations for distributed supply chain planning», *INFOR : Information Systems and Operational Research*, vol. 46, no. 2, pp. 97–116.

- Sargent, R. G. 2005, «Validation and verification of simulation models», in *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*.
- Stadtler, H. 2005, «Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges», *European Journal of Operational Research*, vol. 163, pp. 575–588.
- Stadtler, H. and C. Kilger. 2005, *Supply Chain Management and Advanced Planning : Concepts, Models, Software and Case Studies*, Springer.
- Stewart, G. 1997, «Supply-chain operations reference model (SCOR) : the first cross-industry framework for integrated supply-chain management», *LOGISTICS INFORMATION MANAGEMENT*, vol. 10, pp. 62–67.
- van der Zee, D. and J. van der Vorst. 2005, «A Modeling Framework for Supply Chain Simulation : Opportunities for Improved Decision Making\*», *Decision Sciences*, vol. 36, no. 1, pp. 65–95.

# Annexe A

## Virtual Lumber Case en détail

Ce chapitre constitue une version détaillée du cas présenté au chapitre 3. Certains tableaux de ce chapitre sont disponibles en format Excel seulement. Ces fichiers sont disponibles sur la page web « Mémoires et thèses électroniques de l'Université Laval » de la Faculté des Études Supérieures de l'Université Laval ([www.theses.ulaval.ca](http://www.theses.ulaval.ca)), en faisant une recherche par auteur à « Sébastien Lemieux ».

### A.1 Produits dans le réseau de création de valeur

De l'entrée de l'usine jusqu'à sa sortie, le bois subit plusieurs manipulations et transformations. De plus, plusieurs produits sont créés au cours de ces transformations où chacun a des utilisations spécifiques. Les écorces serviront à produire de l'électricité ou de la vapeur lorsqu'elles seront brûlées. Les sciures et les copeaux seront vendus à d'autres usines pour faire du papier ou des panneaux. Le bois d'œuvre pourra alors commencer sa vie dans le domaine de la construction.

Il est à noter que le domaine forestier canadien, dû à sa proximité du marché américain, a conservé l'utilisation des unités impériales. Par le fait même, les longueurs seront en pieds et les dimensions (largeur et épaisseur) en pouces.

### A.1.1 Billes

Tout d'abord, à l'entrée du réseau, il y a les produits provenant de la forêt. Ceux-ci sont des billes classifiées principalement par l'essence et la longueur de chacune tel qu'indiqué dans le tableau A.1. Dans ce cas-ci, seulement des produits d'épinette (spruce en anglais) sont utilisés de 8 ou 16 pieds. De plus, il est possible que les billes soient regroupées en classes. Ces classes sont principalement formées sur la base du diamètre et permettent de facilement prédire la production des billes. Cette affirmation se fonde sur le fait qu'il est plus facile de prévoir la production d'un groupe relativement homogène que d'un groupe de billes choisies au hasard.

Code	Type	Espèce	Longueur	Numéro de classe
B8SPR	Bille	SPR	8	
B16SPR_1	Bille	SPR	16	1
B16SPR_2	Bille	SPR	16	2
B16SPR_3	Bille	SPR	16	3
B16SPR_4	Bille	SPR	16	4
B16SPR_5	Bille	SPR	16	5
B16SPR_6	Bille	SPR	16	6
B16SPR_7	Bille	SPR	16	7

TAB. A.1: Billes provenant de la forêt

### A.1.2 Produits sciés

Tel que mentionné précédemment, la première transformation que le bois subit est le sciage. Cette opération permet de déterminer de façon grossière les produits finaux. De ces produits, les planches poursuivront leur chemin dans la chaîne de transformation du bois d'œuvre alors que les autres seront utilisés sur place comme combustible ou vendus à un client. Le tableau A.2 décrit la liste des produits après l'opération de sciage.

### A.1.3 Produits séchés

À cette étape, il est possible que le bois passe par une opération de séchage à l'air libre. Par contre, dans notre cas virtuel, tout le bois doit terminer son séchage dans un

Code	Type	Espèce	Dimension	Longueur	État de séchage	Finition
CSPR	Copeaux	SPR				
SSPR	Sciure	SPR				
PSPF	Petite planche	SPF				
LSPR2x3_8GR	Planche	SPR	2x3	8'	Vert	Brute
LSPR2x3_10GR	Planche	SPR	2x3	10'	Vert	Brute
LSPR2x3_12GR	Planche	SPR	2x3	12'	Vert	Brute
LSPR2x3_14GR	Planche	SPR	2x3	14'	Vert	Brute
LSPR2x3_16GR	Planche	SPR	2x3	16'	Vert	Brute
LSPR2x4_8GR	Planche	SPR	2x4	8'	Vert	Brute
LSPR2x4_10GR	Planche	SPR	2x4	10'	Vert	Brute
LSPR2x4_12GR	Planche	SPR	2x4	12'	Vert	Brute
LSPR2x4_14GR	Planche	SPR	2x4	14'	Vert	Brute
LSPR2x4_16GR	Planche	SPR	2x4	16'	Vert	Brute
LSPR2x6_8GR	Planche	SPR	2x6	8'	Vert	Brute
LSPR2x6_10GR	Planche	SPR	2x6	10'	Vert	Brute
LSPR2x6_12GR	Planche	SPR	2x6	12'	Vert	Brute
LSPR2x6_14GR	Planche	SPR	2x6	14'	Vert	Brute
LSPR2x6_16GR	Planche	SPR	2x6	16'	Vert	Brute

TAB. A.2: Produits en sortie du sciage

séchoir pour qu'il soit sec (voir tableau A.3). Durant cette opération, l'essence du bois est un facteur critique dans la détermination de la durée de ce procédé. Par la suite, le critère de l'essence devient non-essentiel; les entreprises indiquant souvent comme essence « épinette-pin-sapin » (en anglais, SPF : Spruce-Pine-Fir) dans leur système d'informations.

#### A.1.4 Produits finis

La dernière étape permet de donner à chaque produit une finition telle que demandée par le client et de le classer selon sa qualité. Ainsi, il existe une très grande variété de produits qu'il est possible de vendre comme le démontre le tableau A.4.

Il est à noter que les produits, à la fin du réseau de création de valeur auront des dimensions inférieures à celles qui les caractérisent<sup>1</sup>. En effet, un 2x4 aura une épaisseur de 1 $\frac{1}{2}$ " ainsi qu'une largeur de 3 $\frac{1}{2}$ ". Cette étrange réduction de dimension est dû au fait

<sup>1</sup>Pour plus de amples détails, le lecteur est invité à consulter le document intitulé *American Softwood Lumber Standard* du *U.S. Department of Commerce* qui est disponible à l'adresse <http://ts.nist.gov/Standards/Conformity/upload/ps20-05.pdf> (consulté le 2008-12-01)

Code	Type	Espèce	Dimension	Longueur	État de séchage	Finition
LSPR2x3_8AR	Planche	SPR	2x3	8'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x3_10AR	Planche	SPR	2x3	10'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x3_12AR	Planche	SPR	2x3	12'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x3_14AR	Planche	SPR	2x3	14'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x3_16AR	Planche	SPR	2x3	16'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x4_8AR	Planche	SPR	2x4	8'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x4_10AR	Planche	SPR	2x4	10'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x4_12AR	Planche	SPR	2x4	12'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x4_14AR	Planche	SPR	2x4	14'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x4_16AR	Planche	SPR	2x4	16'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x6_8AR	Planche	SPR	2x6	8'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x6_10AR	Planche	SPR	2x6	10'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x6_12AR	Planche	SPR	2x6	12'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x6_14AR	Planche	SPR	2x6	14'	Sèche air libre	Brute
LSPR2x6_16AR	Planche	SPR	2x6	16'	Sèche air libre	Brute
LSPF2x3_8DR	Planche	SPF	2x3	8'	Sèche	Brute
LSPF2x3_10DR	Planche	SPF	2x3	10'	Sèche	Brute
LSPF2x3_12DR	Planche	SPF	2x3	12'	Sèche	Brute
LSPF2x3_14DR	Planche	SPF	2x3	14'	Sèche	Brute
LSPF2x3_16DR	Planche	SPF	2x3	16'	Sèche	Brute
LSPF2x4_8DR	Planche	SPF	2x4	8'	Sèche	Brute
LSPF2x4_10DR	Planche	SPF	2x4	10'	Sèche	Brute
LSPF2x4_12DR	Planche	SPF	2x4	12'	Sèche	Brute
LSPF2x4_14DR	Planche	SPF	2x4	14'	Sèche	Brute
LSPF2x4_16DR	Planche	SPF	2x4	16'	Sèche	Brute
LSPF2x6_8DR	Planche	SPF	2x6	8'	Sèche	Brute
LSPF2x6_10DR	Planche	SPF	2x6	10'	Sèche	Brute
LSPF2x6_12DR	Planche	SPF	2x6	12'	Sèche	Brute
LSPF2x6_14DR	Planche	SPF	2x6	14'	Sèche	Brute
LSPF2x6_16DR	Planche	SPF	2x6	16'	Sèche	Brute

TAB. A.3: Produits en sortie du séchage

que traditionnellement, les mesures de dimension étaient prises après l'opération de sciage. Les opérations successives dans la chaîne de création de valeur enlevaient  $\frac{1}{4}$ " sur chaque face, principalement dans l'opération de rabotage. Les standards ont donc été construits à partir de ces informations. De nos jours, les opérations de rabotage sont de plus en plus précises et enlèvent moins de matière lors de leurs exécutions. Ainsi, lors du sciage, il sera possible de tenir compte de ces innovations et réduire les dimensions initiales du produit tout en respectant les standards des produits finis.

Code	Type	Espèce	Dimension	Longueur	État de séchage	Finition	Qualité
LSPR2x3_8DP_12	Planche	SPF	2x3	8'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x3_8DP_3	Planche	SPF	2x3	8'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x3_8DP_4	Planche	SPF	2x3	8'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x3_10DP_12	Planche	SPF	2x3	10'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x3_10DP_3	Planche	SPF	2x3	10'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x3_10DP_4	Planche	SPF	2x3	10'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x3_12DP_12	Planche	SPF	2x3	12'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x3_12DP_3	Planche	SPF	2x3	12'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x3_12DP_4	Planche	SPF	2x3	12'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x3_14DP_12	Planche	SPF	2x3	14'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x3_14DP_3	Planche	SPF	2x3	14'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x3_14DP_4	Planche	SPF	2x3	14'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x3_16DP_12	Planche	SPF	2x3	16'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x3_16DP_3	Planche	SPF	2x3	16'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x3_16DP_4	Planche	SPF	2x3	16'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x4_8DP_12	Planche	SPF	2x4	8'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x4_8DP_3	Planche	SPF	2x4	8'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x4_8DP_4	Planche	SPF	2x4	8'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x4_10DP_12	Planche	SPF	2x4	10'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x4_10DP_3	Planche	SPF	2x4	10'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x4_10DP_4	Planche	SPF	2x4	10'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x4_12DP_12	Planche	SPF	2x4	12'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x4_12DP_3	Planche	SPF	2x4	12'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x4_12DP_4	Planche	SPF	2x4	12'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x4_14DP_12	Planche	SPF	2x4	14'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x4_14DP_3	Planche	SPF	2x4	14'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x4_14DP_4	Planche	SPF	2x4	14'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x4_16DP_12	Planche	SPF	2x4	16'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x4_16DP_3	Planche	SPF	2x4	16'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x4_16DP_4	Planche	SPF	2x4	16'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x6_8DP_12	Planche	SPF	2x6	8'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x6_8DP_3	Planche	SPF	2x6	8'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x6_8DP_4	Planche	SPF	2x6	8'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x6_10DP_12	Planche	SPF	2x6	10'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x6_10DP_3	Planche	SPF	2x6	10'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x6_10DP_4	Planche	SPF	2x6	10'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x6_12DP_12	Planche	SPF	2x6	12'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x6_12DP_3	Planche	SPF	2x6	12'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x6_12DP_4	Planche	SPF	2x6	12'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x6_14DP_12	Planche	SPF	2x6	14'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x6_14DP_3	Planche	SPF	2x6	14'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x6_14DP_4	Planche	SPF	2x6	14'	Sèche	Rabotée	#4
LSPR2x6_16DP_12	Planche	SPF	2x6	16'	Sèche	Rabotée	#1-2
LSPR2x6_16DP_3	Planche	SPF	2x6	16'	Sèche	Rabotée	#3
LSPR2x6_16DP_4	Planche	SPF	2x6	16'	Sèche	Rabotée	#4

TAB. A.4: Produits en sortie du réseau de création de valeur

## A.2 Processus

Dans une usine, les personnes chargées de faire la planification utilisent leur expérience et leur bon sens pour établir le calendrier de production. Pour reproduire cette façon de faire, les agents de la PEPF utilisent chacun un engin de planification. Ce

dernier est composé principalement d'une heuristique, d'un programme linéaire mixte en nombres entiers ou d'un programme de résolution par contraintes selon le cas. Cet engin est alimenté par un calendrier de disponibilité des machines ainsi que par une liste de processus compatibles pour chaque machine.

Un processus est composé d'un volume de produits consommés, d'un volume de produits fabriqués ainsi que des machines nécessaires avec le temps utilisé par chacune. Pour créer ces processus dans la PEPF, l'utilisateur doit importer un fichier correspondant à la définition des processus pour chaque agent. Dans le cadre de VLC, seulement les agents sciage, séchage et finition nécessitent ce type de fichiers. Les fichiers Sawing.xls, Drying.xls et Finishing.xls exposent l'information des processus sous un format beaucoup plus convivial.

Pour chaque fichier, la première section (voir tableau A.5) définit le processus. Ainsi, il est possible de déterminer rapidement le type de processus et le code utilisés par l'entreprise. D'autres informations viennent compléter le processus tels que le patron de coupe, la ligne utilisée et la famille du produit. Cette dernière information permet de les classer en groupe de processus compatibles. Dans une usine, il est facile de passer d'un processus à un autre lorsqu'ils font partis d'une même famille alors qu'il est plus difficile, voir même impossible dans le cas contraire. Par exemple, lors du sciage des billes, beaucoup de copeaux sont créés. Les principaux acheteurs de ces copeaux sont les usines à papier. Ces dernières demandent à ce que les copeaux soient triés par essence pour réduire l'utilisation d'agents de blanchiment. Pour rencontrer cet exigence des clients, les usines doivent scier les essences séparément pour ne pas contaminer les copeaux.

La section suivante du fichier détermine la quantité de matière utilisée par ce processus. Dans le tableau A.6, chaque produit en entrée est accompagné de la quantité utilisée. Dans les usines québécoises, les unités utilisées sont les mètres cube ( $m^3$ ) pour les billes, dû au fait que le gouvernement québécois est le principal propriétaire de la forêt, et les pieds mesure de planche (PMP) pour les planches (c.-à-d., les produits

Type de processus :	Sciage
Code :	B16SPR_1-1
Patron de coupe :	Patron 1
Ligne de sciage :	Primaire
Famille :	SPR16

TAB. A.5: Définition du type de processus

utilisés en construction).

La troisième partie indique la quantité de matière qui sera produite. Comme précédemment, le tableau A.7 montre pour chaque produit le volume produit. Dans ce cas-ci, les unités utilisées sont les PMP pour les planches, les tonnes métriques (t) pour les copeaux et les mètres cube (m<sup>3</sup>) pour la sciure.

La dernière section d'un processus indique le temps utilisé pour chaque machine tel que l'indique le tableau A.8. Pour résumer, un processus est composé d'un volume de produits en entrée, un panier de produits en sortie et un temps d'utilisation pour effectuer ce processus.

### A.3 Les clients

La définition générale des clients est faite à la section 3.4. Par contre, il existe plusieurs fichiers de paramétrage des clients. En effet, il en existe quatre pour représenter les différentes configurations de clients qui seront utilisées dans les simulations (nommés SimulatedCustomer - X% Contract.xls). Dans chaque fichier de caractérisation des clients, les premières colonnes représentent le produit ainsi que la relation client-fournisseur.

Dans les colonnes subséquentes, différents paramètres entourant les aspects aléatoires de l'agent sont inscrits dépendamment du type de client de façon à modéliser. Chaque paramètre de génération peut être modélisé par une fonction de distribution. Il existe différents types de fonction qui sont déjà implantés dans l'agent client tel qu'illustré dans le tableau A.9.

Cependant, le nombre de paramètres diffère selon le type de fonction utilisée (voir Tableau A.10). Ainsi, pour toute les fonctions, il est nécessaire de spécifier le nombre d'intervalles (c.-à-d. le niveau de discrétisation). De plus, il faut spécifier la valeur minimale et la valeur maximale de façon à ce que l'agent puisse construire la liste des intervalles. Par exemple, avec un nombre d'intervalle de 5 allant de 5 jusqu'à 10, l'agent construira la liste d'intervalles  $I$  telle qu'inscrite à l'équation A.1

$$I = ([5,6[, [6,7[, [7,8[, [8,9[, [9,10]) \quad (\text{A.1})$$

À chaque intervalle, un poids  $y$  est associé qui correspond à la probabilité que cet

Produit consommé	Quantité consommée
B8SPR	
B16SPR_1	6.952
B16SPR_5	
B16SPR_4	
B16SPR_3	
B16SPR_6	
B16SPR_2	
B16SPR_7	

TAB. A.6: Volumes consommés d'un processus

Produit fabriqué	Quantité produite
CSPR	2.068
SSPR	0.109
PSPF	93.5
LSPR2x3_8GR	40
LSPR2x3_10GR	15
LSPR2x3_12GR	138
LSPR2x3_14GR	126
LSPR2x3_16GR	440
LSPR2x4_8GR	5.333333333
LSPR2x4_10GR	20
LSPR2x4_12GR	8
LSPR2x4_14GR	9.333333333
LSPR2x4_16GR	32
LSPR2x6_8GR	
LSPR2x6_10GR	
LSPR2x6_12GR	
LSPR2x6_14GR	
LSPR2x6_16GR	

TAB. A.7: Volumes produits d'un processus

Utilisation	Durée
Trimmer	0
Bull	350

TAB. A.8: Temps d'occupation des machines par processus

Fonction	Description
Uniforme	Valeurs constantes sur l'intervalle
Fonction personnalisée	Fonction personnalisée et définie par l'utilisateur
Non-spécifiée	Valeurs inscrites dans un vecteur (chaque valeur d'intervalle est explicitement définie par l'utilisateur)
Normale	Valeurs suivant une loi normale

TAB. A.9: Fonctions de distribution implantées

intervalle soit choisi par le générateur de nombre aléatoire uniforme. Ce poids peut être explicitement donné par l'utilisateur ou il est calculé par l'agent en utilisant les paramètres supplémentaires dans le cas des fonctions uniformes, personnalisées et normale.

### A.3.1 Client spot

Ainsi, selon le type de client, il sera nécessaire de modéliser certains paramètres de génération afin que l'agent client puisse générer de la demande et émuler le comporte-

Fonction de distribution	Paramètre 1	Paramètre 2	Paramètre 3	Paramètre 4	Paramètre 5
Uniforme	Intervalles	Valeur min	Valeur max		
Fonction personnalisée	Intervalles	Valeur min	Valeur max	Équation	
Non-spécifiée	Intervalles	Valeur min	Valeur max	Vecteur des valeurs	
Normale	Intervalles	Valeur min	Valeur max	Moyenne	Écart-type

TAB. A.10: Paramétrage des fonctions de distribution

ment de celui-ci. Pour le client spot, il sera nécessaire de caractériser les paramètres de génération suivants :

- Saisonnalité : représente le caractère périodique de la demande durant l'horizon de simulation
- Quantité totale : Volume total demandé par ce produit durant l'horizon de simulation
- Quantité par demande : Volume demandé à chaque demande
- Délai de livraison : Temps entre l'appel du client et la date de livraison demandée
- Délai de réponse : Temps limite accordé au fournisseur pour répondre à son client à la suite d'une nouvelle demande

De plus, des paramètres entourant le comportement de l'agent sont nécessaires au bon fonctionnement des opérations. Pour le client spot, il faut définir le retard acceptable. Ce paramètre permet de retarder une demande de  $x$  jours de façon à offrir une certaine souplesse dans un processus de demande qui serait trop immuable autrement. De plus, un paramètre pour confirmer un certain pourcentage des demandes est présent de façon à ce que le premier plan de demande soit un peu plus contraignant. Ainsi, une partie de la demande devra obligatoirement être comblée par le réseau de création de valeur.

### A.3.2 Client contractuel

De la même façon, le client contractuel devra être modélisé avec les paramètres de génération suivants :

- Saisonnalité : représente le caractère périodique de la demande durant l'horizon de simulation
- Quantité totale : Volume total demandé par ce produit durant l'horizon de simulation
- Intervalle entre deux demandes : Nombre de jours entre deux demandes
- Variabilité sur les quantités : Facteur multiplicatif pour varier les demandes dans l'horizon évolutif
- Niveau de bruit sur les demandes : Facteur multiplicatif pour modifier le volume des demandes lors de la création de celles-ci

Outre ces paramètres de génération, trois paramètres comportementaux permettent de définir les horizons de demandes. Ces horizons agissent de sorte à ajouter un élément d'incertitude plus les demandes sont dans le futur.

- Définitif : Les volumes des demandes sont fixes et ne peuvent pas être modifiés
- Évolutif : Les volumes peuvent être modifiés mais sont bornés par un minimum et un maximum
- Provisoire : Les volumes peuvent être modifiés et ne sont en aucun cas contraint.

# Index

- Advanced Planning and Scheduling, 7
- agent, 29
- APS, voir Advanced Planning and Scheduling, 8
- APS multiagent, 8
- client, 6, 110
  - contrat, 7, 113
  - spot, 6, 113
- Enterprise Resource Planning, 7
- ERP, voir Enterprise Resource Planning
- fonction de densité, 13
- Material requirements planning, 7
- MRP, voir Material requirements planning
- nombre aléatoire, 19
  - non uniforme, 22
  - pseudo-aléatoire, 21
  - tests de Diehard, 20
  - uniforme, 19
- PEPF, voir Plateforme Expérimentale de Planification FORAC
- Pied mesure de planche, 35
- Plateforme Expérimentale de Planification FORAC, 8, 108
- PMP, voir Pied mesure de planche
- processus, 109
- régression, 13
  - analyse résiduelle, 16
  - Lack-of-Fit test*, 16
  - linéaire simple, 15
  - multiple, 18
- réseau de création de valeur, 5
- SCM, voir Supply Chain Management
- simulation
  - évènement, 26
  - centralisée, 23
  - décentralisée, 23
  - multiagent, 29
  - temps constant, 24
  - validation, voir validation
- Supply Chain Management, 7
- validation, 27–28
  - données, 27
  - modèle conceptuel, 28
  - opérationnelle, 28
- variable
  - aléatoire, 11
  - continue, 12
  - discrète, 11
- Virtual Lumber Case, 31, 109
- VLC, voir Virtual Lumber Case