



**Titre:** Optimisation de l'approvisionnement en vieux papiers par la  
Title: simulation à base d'agents

**Auteur:** Gabriel Sauvageau  
Author:

**Date:** 2013

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Sauvageau, G. (2013). Optimisation de l'approvisionnement en vieux papiers par  
Citation: la simulation à base d'agents [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal].  
PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1294/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/1294/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:** Jean-Marc Frayret  
Advisors:

**Programme:** Génie industriel  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

OPTIMISATION DE L'APPROVISIONNEMENT EN VIEUX PAPIERS PAR  
LA SIMULATION À BASE D'AGENTS

GABRIEL SAUVAGEAU

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE INDUSTRIEL)  
DÉCEMBRE 2013

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

OPTIMISATION DE L'APPROVISIONNEMENT EN VIEUX PAPIERS PAR LA  
SIMULATION À BASE D'AGENTS

présenté par : SAUVAGEAU Gabriel

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MARGNI Manuele, Doct., président

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. BAPTISTE Pierre, Doct., membre

## DÉDICACE

*Jusqu'à la victoire, toujours*

- Ché

## REMERCIEMENTS

D'abord, je remercie mon directeur de mémoire, Jean-Marc Frayret. Présent du début jusqu'à la fin, il s'est donné corps et âme — souvent plus que nécessaire — à l'accomplissement de ce projet. Par la suite, Amine Hajjoussef s'est rajouté à notre duo pour aider à coder le modèle. Son talent en informatique est responsable en grande partie de la qualité de la simulation obtenue.

Ensuite, je me dois de remercier Dany Paradis et surtout Yan St-Pierre, qui ont cru en moi et m'ont donné la chance de bâtir le projet avec eux. Dans le même ordre d'idée, un remerciement particulier pour Brian Mcgurk qui a choisi de reprendre le projet (et moi-même par extension!) sous son aile malgré le peu de choses qu'il savait de moi. Comme M. St-Pierre, il aura été un mentor que ce soit dans le cadre du projet ou de mon cheminement professionnel.

Par ailleurs, plusieurs personnes m'ont aidé à compléter ce mémoire au cours des deux dernières années. Je songe notamment à Alvaro Gil, Dave Nielson, Ryan Deberry et Catherine Beaudry. Je vous suis reconnaissant.

Finalement, je tiens à remercier le FQRNT et le CRSNG sous la banderole de BMP Innovation pour l'acceptation mon projet et leur soutien financier.

## RÉSUMÉ

La gestion de la chaîne d'approvisionnement est un savoir-faire essentiel à la réussite des entreprises. Cela demande de plus en plus de précision, d'adaptation et de flexibilité. S'imbriquant dans ce contexte complexe et évolutif, ce mémoire propose d'utiliser un modèle de simulation à base d'agents pour étudier la performance de différentes politiques d'approvisionnement et de production dans l'industrie du vieux papier. Développé en partenariat avec un grand producteur de pâte à papier recyclée en Amérique du Nord, le modèle de simulation détaille un producteur de pâte recyclée et ses fournisseurs de vieux papiers. Plus précisément, il émule le comportement de gestionnaires et de processus de production et d'approvisionnement.

Suivant l'objectif d'optimiser la stratégie d'approvisionnement de l'entreprise partenaire tout en respectant sa stratégie de production, une série d'expériences composée de diverses politiques d'achat et opérationnelles a été conduite. La principale conclusion portant sur la flexibilité de la production semble indiquer que cette dernière a un impact négatif sur les coûts, l'inventaire et la qualité. Il est possible de réduire partiellement ces effets avec l'introduction d'une politique de contrats flexibles, mais son effet est limité. Une stratégie plus efficace pour réduire les coûts est de réduire la cadence planifiée au minimum requis pour répondre à la demande. Enfin, un inventaire cible élevé permet de réduire les coûts d'achat, mais sa performance globale dépend des coûts d'entreposage.

## **ABSTRACT**

The coordination of procurement and production activities is an essential part of business success. It requires accurate information and flexibility to adapt to complex and constantly changing business conditions. In this general context, this paper proposes to use an agent-based simulation model to study and analyze the performance of various procurement and production policies in the waste paper industry, between a recycled pulp producer and its waste paper suppliers. A detailed simulation model developed in partnership with a large recycled pulp producer in North America was developed in order to emulate the managers' behaviour and the production and procurement processes.

A series of experiments was carried out in order to optimize of the procurement and production policies, in several productions contexts. Results show that production flexibility has a negative impact on costs, inventory and quality. However, it is possible to partially reduce these issues with the introduction of flexible contracts, although only a limited effect has been observed in our experiments. A more significant strategy to improve costs consists in reducing production rate to the minimum required to meet demand.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES .....	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XIII
LISTE DES ANNEXES .....	XIV
INTRODUCTION.....	1
Cadre pratique .....	2
L'industrie du papier recyclé.....	2
La pâte recyclée.....	3
Le vieux papier.....	3
Le contrôle de la qualité .....	4
L'achat du vieux papier et son marché.....	5
Processus de fabrication de pâte recyclée .....	6
Problématique étudiée .....	7
Objectifs du mémoire .....	8
Objectif général .....	8
Objectifs spécifiques .....	8
Structure du mémoire .....	9
CHAPITRE 1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	10

1.1	Notions théoriques.....	10
1.1.1	Outils d'optimisation et chaîne logistique.....	10
1.1.2	Simulation à base d'agents.....	11
1.2	Notions pratiques.....	14
1.2.1	Le marché du vieux papier .....	14
1.2.2	Politique d'achat.....	16
1.2.3	Politique de gestion d'inventaire .....	18
CHAPITRE 2. MÉTHODOLOGIE .....		20
CHAPITRE 3. WASTE PAPER PROCUREMENT OPTIMIZATION: AN AGENT-BASED SIMULATION APPROACH.....		22
3.1	Introduction .....	22
3.1.1	The recycled pulp and paper industry .....	22
3.2	Literature review .....	24
3.3	Simulation Model.....	27
3.3.1	General Overview .....	27
3.3.2	Model description.....	30
3.4	Methodology and experiments .....	38
3.4.1	Model implementation .....	38
3.4.2	Model setup and validation .....	38
3.4.3	Experimental Design and methodology .....	39
3.5	Results and Analysis .....	40
3.5.1	Key performance indicators .....	40
3.5.2	Model validation .....	40
3.5.3	Results and analysis .....	42
3.6	Discussion and Conclusion .....	50

3.7	Acknowledgement.....	51
3.8	Annexe: Key performance indicators definition .....	51
CHAPITRE 4. DISCUSSION GÉNÉRALE.....		53
4.1	Discussion sur la méthode.....	53
4.2	Discussion pratique .....	53
4.3	Leçons et apprentissages .....	54
CONCLUSION, RECOMMANDATION ET TRAVAUX FUTURS .....		56
BIBLIOGRAPHIE .....		57
ANNEXES .....		62

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Listes partielles des 52 grades utilisés en Amérique du Nord .....	4
Tableau 1.1: Liste des facteurs influents du marché du vieux papier .....	16
Table 3.1: Design of experiment .....	39
Table 3.2: Model validation results .....	41
Table 3.3: Average gap to actual data of inventory level and inventory variations.....	41
Table 3.4: Cost impacts of Planned capacity .....	42
Table 3.5: Impact of Target Inventory of various cost components .....	44
Table 3.6: Impact of Production Flexibility of various cost components .....	44
Table 3.7: Impacts of contract flexibility on inventory level and inventory variation with respect to no contract flexibility .....	49

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Les principaux acteurs de l'industrie des pâtes et papiers recyclés .....	2
Figure I.2: Représentation du marché du vieux papier et ses influences .....	5
Figure I.3: Processus de production de l'usine partenaire étudiée.....	6
Figure 1.1 Relation entre la demande en vieux papier et son prix unitaire chez l'entreprise partenaire.....	17
Figure 1.2 : Structure d'approvisionnement en vieux papier suivie par l'entreprise partenaire à ce projet pour l'usine étudiée.....	18
Figure 3.1: Main processes of the recycled pulp and paper industry .....	22
Figure 3.2: Recycled pulp production processes.....	24
Figure 3.3: Model overview .....	28
Figure 3.4: Information flows .....	29
Figure 3.5: Impact of $\alpha$ on the probability of accepting an offer.....	33
Figure 3.6: Effect of $\beta$ on the probability of accepting an offer. ....	33
Figure 3.7: Market price validation over a 10-year period .....	40
Figure 3.8: Combined effect of Target Inventory (TI) level and Production Flexibility (PF) on purchase cost .....	44
Figure 3.9: Combined effect of Target Inventory (TI) level and Planned Capacity (PC) on inventory level.....	45
Figure 3.10: Combined effect of Target Inventory (TI) level and Planned Capacity (PC) on inventory variation .....	46
Figure 3.11: Impact of Production Flexibility on inventory performance .....	47
Figure 3.12: Combined effect of Target Inventory (TI) level and Planned Capacity (PC) on quality (number of defaults).....	47
Figure 3.13: Effect of Production Flexibility (PF) on quality (number of defaults).....	48

Figure 3.14: Combined effect of and Planned Capacity (PC) and Flexible Contract (FC) on  
Warehouse cost .....49

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AF & PA	American Forest & Paper Association
FC	Flexible contract
ISRI	Institute of Scrap Recycling Industries
KPI	Key performance indicator
PC	Planned Capacity
PF	Production Flexibility
PO	Purchase Order
RISI	Resource Information Systems Inc.
SBA	Simulation à base d'agents
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
TI	Target Inventory

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE 1 : COMPOSANTES UTILISÉES DANS LE MODÈLE ET LES DÉMARCHES ENTREPRISES POUR LES DÉFINIR.....	62
---	----

## INTRODUCTION

La gestion de la chaîne d'approvisionnement est un savoir-faire essentiel à la réussite des entreprises. Pourtant, recevoir efficacement le bon produit au bon moment au bon endroit n'est pas simple. C'est un défi de coordination complexe demandant de plus en plus d'adaptation et de flexibilité. C'est d'ailleurs le cas des fabricants de papier recyclé. Existant depuis déjà plusieurs décennies, cette industrie a atteint sa popularité actuelle en partie grâce au développement de stratégies d'approvisionnement du vieux papier collecté. Toutefois, le vieux papier est lentement passé de déchet à commodité recherchée menant à une augmentation du prix du vieux papier. Ce dernier compromet maintenant la viabilité des fabricants de pâte recyclée. Ils doivent remettre en question leurs anciennes stratégies d'approvisionnement. Toutefois, une entreprise est un système complexe. Analyser la stratégie d'approvisionnement conduit aussi à reconsidérer la stratégie opérationnelle puisqu'elles sont étroitement interconnectées. Par conséquent, il faut tenir compte de nombreux acteurs ayant différents objectifs qui interagissent entre eux et évoluent.

Ce mémoire propose d'étudier cette problématique en utilisant l'outil d'analyse appelé la simulation à base d'agents. Cette approche est utilisée pour comprendre des systèmes dynamiques et complexes semblables à une chaîne d'approvisionnement. Plus spécifiquement, elle s'intéresse aux interactions entre plusieurs acteurs appelés agents ayant la capacité individuelle de prendre des décisions et d'agir de façon autonome en fonction du contexte, de son environnement et des autres agents. Cette simulation à base d'agents permet de reproduire les processus d'une entreprise et de proposer des solutions adaptées à sa réalité. Avec cet outil, il devient possible d'étudier l'impact de diverses stratégies d'approvisionnement et de fabrication tout en tenant compte de leurs interactions sur les divers coûts, l'inventaire et la qualité.

La suite de ce chapitre porte sur des concepts utiles à compréhension du modèle et des résultats: le cadre pratique, la problématique étudiée et les objectifs de recherche.

## Cadre pratique

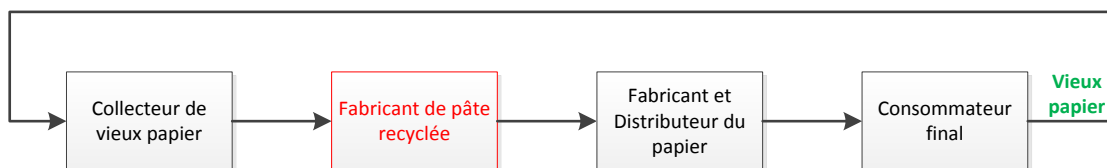


Figure I.1 : Les principaux acteurs de l'industrie des pâtes et papiers recyclés

L'entreprise partenaire à ce projet est une compagnie d'environ 10 000 employés implantée dans le secteur des pâtes et papiers depuis plus de 20 ans. Le modèle développé porte sur une des usines exploitées par l'entreprise en Amérique du Nord. Cette dernière fabrique de la pâte recyclée RBK, entièrement fabriquée à partir de vieux papiers. Elle achète entre 10 et 15 % des vieux papiers de haut grade disponibles sur le marché nord-américain. Cette forte proportion permet à l'acheteur de l'entreprise de contrôler partiellement le prix du vieux papier. De plus, à la création du marché des vieux papiers au début des années 1980, il fut l'un des premiers acteurs à y participer. Ayant une influence considérable par ses quantités achetées et son expérience de 30 ans, ses décisions ont orienté les méthodes employées et le fonctionnement de l'industrie. Tout au long du projet, il a été considéré comme un expert dont les connaissances ont servi à créer ou confirmer les aspects liés aux approvisionnements.

Nous avons eu l'opportunité de passer plus de deux ans avec les employés de l'entreprise située à Montréal. L'usine participante du projet a aussi été visitée afin de rencontrer les employés et de comprendre les différents processus opérationnels.

## L'industrie du papier recyclé

Le papier recyclé est un produit utilisé depuis déjà plusieurs siècles. Toutefois, il a atteint la popularité qu'on lui connaît depuis seulement quelques décennies, car plusieurs défis fondamentaux essentiels à sa survie commerciale demeuraient. Parmi ceux-ci, la matière première utilisée appelée vieux papier se situe en haut de la liste. Il s'agit d'un déchet généré par l'utilisation du papier, vierge ou recyclé, qui a été collecté, en partie trié et usiné à nouveau. Chacune de ces étapes représente un défi singulier. L'industrie du papier recyclé a donc cherché des méthodes optimales pour obtenir de ces déchets un produit fini commercial et rentable. Déjà dans les années 1920, ces problèmes étaient étudiés (Posner, 1988). Depuis, de nombreux

recueils dont ceux de Carr et Appleton (1990), de McKinney (1995) et plus récemment de Stawicki et Read (2010) résument bien les enjeux opérationnels, tactiques et stratégiques de l'industrie du vieux papier. De plus, des organismes comme TAPPI, AF&PA et ISRI proposent des guides industriels, des standards, des statistiques et des meilleures pratiques utiles à la compréhension de l'industrie.

## **La pâte recyclée**

Dans le cas de ce projet, l'unique produit fini étudié est la pâte recyclée, utile à la fabrication de plusieurs catégories de papier allant du simple papier journal jusqu'aux emballages complexes de produits alimentaires. Pour que la pâte recyclée soit fonctionnelle, elle doit respecter plusieurs contraintes chimiques. Toutefois, pour que la pâte recyclage soit fonctionnelle et valorisée, il existe des contraintes esthétiques dont la plus importante : la luminosité de la pâte souvent appelée blancheur.

Il est possible d'améliorer cette blancheur grâce à certains processus chimiques, mais ceux-ci ont des limites. La blancheur de la pâte dépend plutôt de la qualité de ses matières premières, c'est-à-dire le vieux papier. Plus le vieux papier est composé de fibre « avec lignine » (groundwood en anglais) donnant une couleur plus brunâtre à la fibre, moins la blancheur du produit fini est élevée. Une pâte ayant les bonnes propriétés chimiques trouvera généralement un preneur. Toutefois, c'est en grande partie la blancheur qui crée la réelle valorisation du produit final. Pour ces raisons, seule la propriété esthétique « blancheur » est utilisée pour évaluer la qualité du produit fini dans le cadre de ce mémoire.

## **Le vieux papier**

Le vieux papier est un résidu industriel dont le contenu et ses caractéristiques varient beaucoup. Il existe plusieurs catégories de fibres telles que le papier journal, le carton, le papier couché, etc. Chacune de ces catégories a des caractéristiques intrinsèques, dont une proportion de fibres « avec lignine », responsables de la blancheur du produit fini. Ces proportions varient à l'intérieur d'une même catégorie de vieux papier rendant son évaluation difficile. Ainsi, pour mieux connaître le type de matières premières achetées et sa qualité, l'industrie s'est dotée de chartes de ségrégation qui classifient les ballots collectés selon certaines particularités. En combinant ces

caractéristiques, l'organisme ISRI a traduit ces chartes en 52 grades standardisés et utilisés en Amérique du Nord.

Tableau I.1 : Listes partielles des 52 grades utilisés en Amérique du Nord

(1) Residential Mixed Paper
(2) Soft Mixed Paper (SMP)
(3) Hard Mixed Paper (HMP)
(4) Boxboard Cuttings
...
(52) Aseptic Packaging and Gable-Top Cartons

À l'usine partenaire étudiée, seulement quelques grades ISRI sont utilisés sous différentes proportions pour obtenir la qualité finale désirée. La variation dans l'utilisation de chaque grade dépend du niveau de blancheur à atteindre et du coût d'achat de ceux-ci.

### **Le contrôle de la qualité**

Étant un résidu industriel, le contenu d'un ballot de vieux papier varie beaucoup. Malgré les grades et les caractéristiques extrinsèques utilisés pour classer les vieux papiers, la qualité intrinsèque réelle du vieux papier peut être remise en question. En effet, la définition de ces grades s'avère souvent vague et sans référence statistique. Elle laisse place à l'interprétation. Pour pallier à ce problème, l'organisme ISRI recommande l'instauration d'un contrat entre le vendeur et l'acheteur afin de bien qualifier la qualité de la matière échangée. De plus, le client doit souvent effectuer son propre contrôle s'il désire bien connaître la qualité intrinsèque des intrants achetés. Ce contrôle de la qualité encoure des coûts et du temps, mais il permet de payer le juste prix pour la matière achetée et d'améliorer l'efficacité du processus de fabrication.

Malheureusement, les techniques peu coûteuses et rapides sont rares. Déjà dans les années 1920, les experts commençaient à rechercher les meilleures méthodes de ségrégation classant manuellement les différents composants. Bien que cette technique soit assez âgée et longue, elle est encore efficace et surtout peu chère. Depuis, de nombreux recueils sont disponibles dont celui de Carr et Appleton (1990) et plus récemment de Stawicki et Read (2010) pour présenter les différentes techniques, mais elles requièrent souvent de gros investissements et peu de certitudes.

## L'achat du vieux papier et son marché

Étant un processus crucial dans l'industrie de la pâte recyclée, les achats des vieux papiers sont sous la responsabilité du directeur des achats. Il doit prendre les meilleures décisions possible à propos du moment ainsi que de la quantité à acheter. Deux options sont disponibles. Les différents grades de vieux papier peuvent être acquis sous la forme de contrats ou encore sur le marché courant appelé « spot ». Quelle que soit l'approche, le prix d'achat dépend du prix du marché. Celui du vieux papier dépend habituellement de l'offre et de la demande.

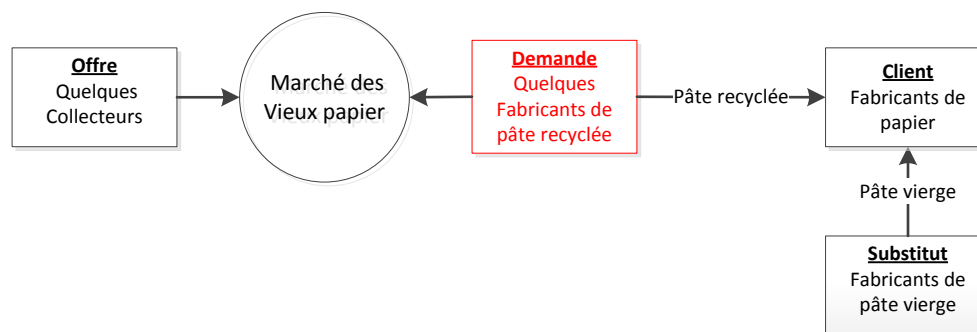


Figure I.2: Représentation du marché du vieux papier et ses influences

Du côté de l'offre, quelques gros collecteurs représentent la majorité des quantités offertes sur le marché. Ces quantités offertes dépendent de deux éléments fondamentaux. Premièrement, le vieux papier est généré lorsque la société consomme du papier. Par exemple, il se fait moins d'affaires en été donc moins de vieux papiers sont générés à cette période. En outre, des événements irréguliers peuvent aussi influencer la consommation de papier. Par exemple, une hausse de génération de vieux papiers a été enregistrée lors de la dernière élection américaine. Deuxièmement, le vieux papier est collecté lorsque la société recycle ses déchets. Si une région consomme beaucoup de papier, mais qu'elle recycle peu, son offre en vieux papier n'est pas importante. Troisièmement, au niveau microéconomique, les collecteurs de vieux papiers n'ont généralement pas d'entrepôt. Ceci implique qu'il est difficile de garder en réserve les quantités amassées au cours du mois. Lorsque le vieux papier est collecté, ils doivent s'en départir, quel que soit son prix courant. Par conséquent, il y a une quantité fixe disponible sur le marché. Si une entreprise achète du vieux papier, il en reste moins pour les autres. Dans le cas de l'entreprise partenaire, l'usine étudiée est un gros joueur. Ses achats diminuent considérablement les quantités disponibles et créent de la rareté.

Du côté de la demande, quelques gros fabricants nord-américains de pâte se partagent une grande partie des quantités offertes. Leurs besoins dépendent directement des clients finaux puisque le vieux papier représente la principale matière première de l'industrie. En d'autres termes, quand la demande en pâte recyclée augmente, la demande en vieux papier augmente de la même proportion. Toutefois, les gros fabricants nord-américains de pâte ne sont pas les seuls à vouloir cette matière rare. Sporadiquement, plusieurs entreprises chinoises font des achats majeurs de vieux papiers. Cela met une forte pression temporaire sur la demande totale et rend sa prédiction à court terme très difficile. Malheureusement, ce dernier élément n'a pas été considéré comme un facteur isolé dans le modèle puisque c'est un phénomène récent dont les conclusions sont difficiles à valider. Parallèlement, la pâte recyclée est en concurrence directe avec la pâte vierge. La pâte vierge devient un produit substitution dans plusieurs cas, car elle répond au même besoin. Le client final peut comparer les deux prix et sélectionner le moins cher. Ainsi, le prix de la pâte vierge affecte la demande de pâte recyclée et nécessairement de vieux papier indépendamment des variations courantes des autres facteurs.

Tous ces facteurs mis en commun tendent à générer des prix très volatiles et complexes à prévoir. La structure du marché et sa composition sont décrites en profondeur dans le chapitre 3.

## Processus de fabrication de pâte recyclée

Le processus de production passe généralement par les étapes suivantes :

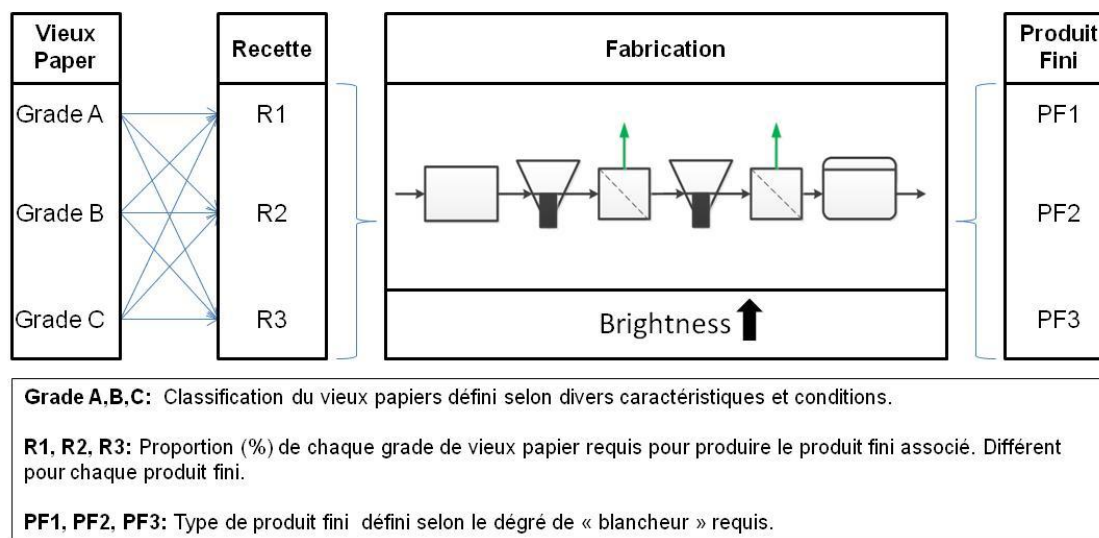


Figure I.3: Processus de production de l'usine partenaire étudiée

Une seule ligne de fabrication composée de plusieurs machines produit en flux continu la pâte. Le processus peut fabriquer tous les produits finis à partir de quelques matières premières. L'éventail des types vieux papier est assez restreint, mais ils sont extrêmement critiques puisqu'ils se trouvent dans chaque produit fini sous différentes proportions. Lorsque l'usine désire fabriquer le produit PF1, la recette correspondante R1 identifie les besoins de chaque type de vieux papier. Les intrants requis sont introduits dans l'unique processus de fabrication et l'usine obtient théoriquement le PF1 quelques heures plus tard. Évidemment, si le type de vieux papier, la recette ou bien la fabrication n'est pas juste, il est possible qu'en tentant de produire PF1, l'usine obtienne PF2 ou PF3.

Ce processus de fabrication requiert des investissements majeurs en machinerie lourde. Les appareils fonctionnent généralement en continu tous les jours puisque les coûts de mise en arrêt planifié et de démarrage sont élevés. Ainsi, les rares fermetures temporaires de la fabrication s'étendent souvent sur plusieurs jours. On peut fermer l'usine pour des raisons de maintenance, mais aussi stratégiques. En effet, une fermeture temporaire peut être planifiée afin de diminuer un surplus d'inventaires de produit fini.

### **Problématique étudiée**

Chacune des caractéristiques de l'industrie de la pâte recyclée est un aspect distinctif à gérer. Par contre, ces aspects sont souvent interdépendants. Cela complexifie fortement leur analyse et leur gestion puisqu'il faut considérer l'ensemble du système et ses interactions. Du côté opérationnel, une première stratégie est de réduire l'impact des coûts d'investissement sur les coûts fixes en fonctionnant au maximum de la capacité. En cas de surproduction, les produits finis en trop sont vendus sans marge de profit à des clients occasionnels. À l'opposé, une deuxième stratégie réduit substantiellement le coût d'achat de la matière première en ralentissant la cadence de production au minimum. Malgré la hausse des coûts de fabrication par unités, cette stratégie réduit les besoins de l'usine en vieux papier. Cela permet de diminuer la demande totale en vieux papiers sur le marché provoquant une baisse de leur prix courant. Ensuite, indépendamment de la stratégie choisie, la cadence change au fil du temps pour de nombreuses raisons, comme la maintenance ou encore moins de commandes clients. Le choix de ces écarts de production fait aussi partie de la stratégie opérationnelle. Une absence de flexibilité se traduit par une cadence de production constante et du même coup permet de prédire la quantité exacte de vieux papiers

nécessaire. Toutefois, elle limite les décisions de gestion. Une flexibilité plus grande donne plus de liberté, mais cela complexifie la planification des autres décisions, dont la gestion des inventaires.

Quelle que soit la stratégie opérationnelle utilisée, sa performance est affectée par la stratégie d'approvisionnement et vice-versa. Une cadence élevée améliore les résultats opérationnels, mais oblige l'acheteur à gérer des problèmes de rareté. À l'inverse, des stratégies d'approvisionnement comme les promesses d'achat fixe ou bien un inventaire cible élevé réduisent le coût d'achat, mais ligotent les mains de la production. Étant complexes, les effets et les interactions des deux stratégies rendent difficile la prise de décision. Il s'agit de considérer plusieurs options avec des conséquences différentes. Aussi, la présence de plus d'un indicateur de performance complique l'optimisation globale du système.

Avec les avantages et désavantages des différentes stratégies, la direction cherche à connaître la cadence, la flexibilité de la production, le type de contrat et l'inventaire cible optimal, c'est-à-dire la stratégie qui génère le moindre coût tout en maintenant un niveau d'inventaire bas et un produit de bonne qualité.

## **Objectifs du mémoire**

Cette section décrit les objectifs généraux et spécifiques de ce mémoire.

### **Objectif général**

Ce projet a pour but d'étudier et d'analyser diverses approches d'amélioration des coûts d'achat de vieux papiers, dans le but de faire de recommandations générales au partenaire industriel du projet. Plus généralement, ce mémoire tente d'aider concrètement les fabricants de pâte recyclée à optimiser leur stratégie d'approvisionnement tout en respectant leurs stratégies de production.

### **Objectifs spécifiques**

Pour atteindre cet objectif, l'élaboration d'objectifs spécifiques impliquant l'étude de diverses politiques d'approvisionnement et opérationnelles est nécessaire :

- Étudier l'impact de l'utilisation de contrat d'achat flexible sur les coûts encourus par l'entreprise, la qualité des produits finis et le niveau d'inventaire de vieux papier.

- Étudier l'impact de différents niveaux d'inventaire cible sur les coûts encourus par l'entreprise, la qualité des produits finis et le niveau d'inventaire de vieux papier.
- Étudier l'impact de différentes cadences de production (c.-à-d., niveau de production journalier planifié) sur les coûts encourus par l'entreprise, la qualité des produits finis et le niveau d'inventaire de vieux papier.
- Étudier l'impact de différents niveaux de flexibilité (c.-à-d., variation du niveau de production) sur les coûts encourus par l'entreprise, la qualité des produits finis et le niveau d'inventaire de vieux papier.

### **Structure du mémoire**

La suite de ce mémoire porte d'abord sur la revue de littérature dans le chapitre 1. Le chapitre 2 expose les démarches entreprises ainsi que la méthodologie de recherche. Le chapitre 3 présente un article soumis au *European Journal of Operational Research* le 3 octobre 2013. Cet article porte sur le modèle développé, et présente une description détaillée de la structure de celui-ci, les expériences réalisées ainsi que les résultats obtenus et l'analyse. Ensuite, le chapitre 4 propose une discussion sur les résultats théoriques et pratiques obtenus et finalement une conclusion présente les possibilités de recherche.

## **CHAPITRE 1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

Plusieurs notions proposées dans la littérature ont aidé à répondre aux objectifs de ce projet. Ce chapitre fait une revue sommaire de ces notions théoriques en première partie. Ensuite, d'autres concepts clés portant plus précisément sur les contraintes de l'usine étudiée et de l'industrie du papier ont été développés à partir de la littérature académique et industrielle dédiée à l'industrie des pâtes et papiers, ainsi que de documents privés de l'entreprise partenaire. Ce chapitre présente ainsi ces notions pratiques en deuxième partie.

### **1.1 Notions théoriques**

Cette section décrit un ensemble de domaine de recherche et des concepts théoriques nécessaires à la compréhension de la problématique étudiée et à la méthode de recherche utilisée.

#### **1.1.1 Outils d'optimisation et chaîne logistique**

La gestion de la chaîne d'approvisionnement est un savoir-faire essentiel à la réussite des entreprises. Toutefois, l'évolution rapide des conditions changeantes en fait souvent un défi de coordination complexe. C'est d'ailleurs le cas des fabricants de papier recyclé qui doivent faire face à un tel défi. D'une part, l'utilisation de papier diminue en Amérique du Nord, réduisant du même coup la disponibilité de la matière première, le vieux papier. D'autre part, les fabricants de papier vierge utilisent une plus grande proportion d'adjuvants non fibreux (contaminants) limitant du même coup les quantités de fibre directement réutilisable pour la fabrication de la pâte recyclée. Les producteurs de papier recyclé doivent donc acheter plus de vieux papiers pour maintenir leur production. Lorsqu'ils sont combinés à une croissance de la concurrence mondiale, ces défis provoquent une hausse de la demande de vieux papier et, au final, des prix volatiles et une disponibilité plus incertaine. Ils doivent remettre en question leurs anciennes stratégies d'approvisionnement afin de les évaluer et les optimiser.

Pour optimiser la gestion de sa chaîne d'approvisionnement, les entreprises sont souvent supportées par des techniques d'optimisation traditionnelles, telles que la programmation mathématique, des modèles théoriques d'inventaire, et d'autres outils d'optimisation mathématique, y compris l'optimisation robuste et stochastique. Pour avoir plus d'information à leurs sujets, Dekker et al. (2012) font une revue récente des outils de recherche opérationnelle

notamment utilisés dans le secteur de la logistique verte. En constante amélioration, ces outils sont de plus en plus capables d'identifier des solutions optimales dans des conditions particulières ou incertaines. Cependant, même s'ils peuvent être des outils très efficaces, leur paradigme de modélisation a de la difficulté à traiter efficacement des situations complexes caractérisées par de grandes quantités d'événements simultanés, des décisions qui s'entre-influencent, des boucles de rétroaction et des phénomènes émergents. Ces défis sont généralement mieux résolus par les outils de simulation. C'est avec cet outil méthodologique que ce mémoire étudie et optimise le processus d'approvisionnement du partenaire industriel du projet.

La simulation est utilisée dans des contextes stochastiques et dynamiques puisque son objectif est la plupart du temps d'identifier des tendances et des comportements récurrents. Il s'agit généralement de situations où la compréhension de ces tendances est plus essentielle que de trouver une solution optimale (Davidsson et al, 2007; Lomi et Larsen 1996; Moss et Edmonds 2005; Cartier et Forgues 2006; Harrison et al. 2007). Cartier et Forgues (2006) en particulier ont identifié les avantages de l'utilisation de la simulation pour les sciences appliquées en gestion. La simulation a la capacité à mieux représenter les comportements et les interactions des systèmes complexes étudiés dans le domaine appliqué. De plus, l'outil permet aux gestionnaires et aux chercheurs de bien visualiser le problème sous forme d'éléments interdépendants. Pour les lecteurs intéressés au sujet de la simulation, Gilbert et Troitzsch (2005) font une revue assez exhaustive des différents types développés dans la littérature tels que les automates cellulaires, les modèles multiagents et modèles à événements discrets. Ils y décrivent avec détail leurs utilités et leurs utilités potentielles.

### **1.1.2 Simulation à base d'agents**

La simulation à base d'agents plus particulièrement (i.e. SBA) est utilisée dans plusieurs disciplines dont l'écologie, les sciences sociales et l'ingénierie pour représenter et comprendre des systèmes dynamiques et complexes semblables à une chaîne d'approvisionnement (Siebers 2010; Frayret 2011; Barbaty et al. 2012). Plus spécifiquement, cette méthode s'intéresse aux interactions entre plusieurs acteurs ayant la capacité individuelle de prendre des décisions et d'agir de façon autonome selon les informations obtenues de l'environnement ou des autres acteurs (Charles et Michel 2006; Macal et al., 2010). Dans le contexte de ce mémoire, la simulation à base d'agents peut reproduire des comportements et des tendances émergentes d'une

chaîne d'approvisionnement afin de les étudier (Moyaux et al., 2007; Bahroun et al., 2010, Farnia et al. 2013). Dans un même ordre d'idée, Bollinger et al. (2012) ont associé trois avantages intéressants à la SBA en contexte de chaîne d'approvisionnement. Premièrement, la SBA peut simuler des entités discrètes individuellement avec leurs propriétés uniques et hétérogènes. Cela peut être par exemple une usine ou encore des déchets industriels. Deuxièmement, elle permet de représenter clairement et explicitement des systèmes complexes du monde réel. Troisièmement, la SBA peut émuler le comportement des acteurs du monde réel.

Bien que la SBA n'ait jamais, à notre connaissance, été directement appliquée à l'industrie du papier recyclé, elle a été utilisée dans de nombreux contextes où l'objectif était d'optimiser les problèmes de coordination de la chaîne d'approvisionnement. Barbati et al. (2012) ont identifié pas moins de 66 contributions académiques dans six familles différentes applications de la chaîne d'approvisionnement. Avec un objectif plus pointu, Pechoucek et Mařík (2008) ont examiné certaines de ces fonctionnalités, qui comprennent les prévisions de la demande (Liang et Huang 2006), la production et le contrôle de la qualité (Castellini et al. 2011), le contrôle des stocks (Kim et al. 2010), la coordination globale d'une chaîne d'approvisionnement (You and Kumar 2006. Frayret et al 2007, Gaudreault et al 2012), la planification (Lau et 2006 al.), la sélection des fournisseurs (Valluri et Croson 2005) et les positions de points de découplages d'une chaîne d'approvisionnement (Cid et al 2009). En ce qui concerne le processus d'approvisionnement, Jie et Li (2008) ont construit un modèle générique reproduisant le processus de gestion des achats et des inventaires à l'intérieur d'une simulation à événements discrets. Bien que leur modèle soit simple, il révèle les éléments et attributs nécessaires au développement d'une simulation présentant un processus d'approvisionnement. Suivant une idée similaire, Allwood et Lee (2005) ont proposé un modèle de simulation à base d'agents incluant une usine, ses clients et ses fournisseurs dans un contexte de compétition. Dans cet article, les auteurs ont optimisé certaines décisions stratégiques et pratiques d'achats. Bien que cette étude propose un modèle pertinent de la chaîne d'approvisionnement, il ne prend pas en compte certains indicateurs comme les coûts d'opportunité et les coûts d'achat lorsque l'inventaire cible est déterminé. De plus, l'effet de cette cible est limité à la détermination du point de commande. Le modèle permet l'ajustement des quantités achetées en fonction des variations des prix du marché. Toutefois, il ne tient pas compte du fait que l'usine peut aussi ajuster ses décisions de production. En outre, ces variations des prix du marché sont fixées de manière aléatoire entre des limites précises, et ne sont donc pas

affectées par la stratégie de production de l'usine, ce qui est le cas dans le contexte d'un grand producteur de pâte recyclée comme l'usine partenaire. Similairement, Uppin et Hebbal (2010) ont aussi proposé un modèle de SBA qui comprend les activités d'achat. Cependant, il n'existe pas d'interactions dynamiques entre les fournisseurs et l'acheteur et le marché n'est pas sensible aux décisions prises par les acteurs au cours de la simulation.

Parallèlement, plusieurs études ont proposé d'utiliser la SBA dans diverses applications industrielles. Par exemple, la SBA a servi d'outil d'aide à la décision pour la planification de la capacité stratégique et la sélection des clients pour une usine de fabrication de boîte (Belecheanu et Luck (2005); (Belecheanu, Munroe et al. (2006)). L'objectif était d'analyser l'impact de décisions stratégiques sur des indicateurs situés en aval de la production tels que l'inventaire, le service à la clientèle et le délai de livraison de l'usine. Une fois les processus fidèlement représentés, différentes décisions de capacités et de sélection de clients pouvaient être testées. Il existe plusieurs autres cas d'application concrète. Par exemple, les auteurs Sislak et al. (2008) introduisent une SBA pour le contrôle du trafic aérien. Dans l'article de Pechoucek et al. (2007), on y simule la planification et le contrôle d'un fabricant de moteurs. En dépit de tous ces exemples, il n'existe pas à notre connaissance de modèle de SBA dédié à l'étude de la coordination production-approvisionnement dans le secteur de la production de pâte recyclée.

Par ailleurs, certains chercheurs dans le domaine de la logistique verte se sont intéressés à la simulation à base d'agents. Ils ont entre autres présenté des applications de SBA en situation de chaînes d'approvisionnement en boucle fermée. Par exemple, Axtell et al. (2001) ont proposé d'utiliser la SBA dans un contexte d'écologie industrielle tout en présentant plusieurs avantages potentiels. Dans les années qui ont suivi, l'idée a été mise en application. D'abord, un modèle a été développé afin d'étudier l'évolution des parcs éco-industriels (Cao et al. 2009). Ensuite, Bollinger et al. (2012) ont développé un modèle multiagent dans le cadre du recyclage de téléphone mobile. D'ailleurs, celui-ci possède plusieurs similitudes avec l'industrie du papier recyclé. Le modèle comporte les mêmes contraintes de variations des matières premières, les taux de collecte et de récupération de déchet réutilisable et le marché secondaire de revente. Leur modèle de simulation se compose d'une représentation réaliste de la chaîne d'approvisionnement en boucle fermée des téléphones mobiles. Cette chaîne reproduit les principaux acteurs de l'industrie que sont les fabricants, les recycleurs, les collecteurs, les usines de reconditionnement et un marché mondial de matières disponibles. Sous certaines contraintes comme d'importantes

variations de qualité, le modèle propose aussi un ensemble de règles de décision pour contrôler l'achat et la transformation des téléphones mobiles ainsi que pour gérer les contrats et la capacité de production (par exemple, l'achat ou non de technologies). Beaucoup de ces concepts ont été utilisés pour bâtir le modèle proposé dans le présent mémoire. Toutefois, par rapport à Bollinger et al. (2012), notre modèle se concentre sur un seul fabricant de pâte recyclée et sur l'optimisation de son processus d'approvisionnement spécifique et complexe, plutôt que d'avoir un aperçu des tendances émergentes à travers l'ensemble d'une chaîne d'approvisionnement.

## **1.2 Notions pratiques**

L'industrie du papier recyclé est le sujet de peu de recherches académiques. Par contre, avec des experts du domaine, des données industrielles et des organisations internationales telles que AF & PA, TAPPI, RISI et Moore, il est possible d'obtenir des connaissances comparables avec l'avantage d'être directement en lien avec ces riches sources d'information. Ainsi, plusieurs composantes utilisées dans le modèle proviennent d'une collecte de connaissances professionnelles. Sans qu'elles soient faciles à traiter, ces composantes ont été configurées uniquement avec l'information et les données recueillies. La liste de ces composantes et les démarches entreprises pour les définir sont résumées dans le tableau présenté en annexe 1. Toutefois, certains concepts clés du modèle, aussi utilisés pour la phase d'expérimentation, ont demandé une recherche poussée de la littérature scientifique. La combinaison de connaissances appliquées et académiques permet d'évaluer et comparer les processus actuels avec les bonnes pratiques identifiées dans la littérature. Cela a aidé la construction du modèle ainsi que la définition des différentes pratiques testées. Voici ces concepts clés.

### **1.2.1 Le marché du vieux papier**

Le marché du vieux papier dépend habituellement de l'offre et de la demande. Du côté de l'offre, celle-ci s'avère complexe et variable. Le vieux papier n'est pas fabriqué. Il s'agit d'un résidu généré. Cela complique l'évaluation des quantités disponibles sur le marché, mais sa compréhension a été abordée depuis un demi-siècle. Dès les années 1970, Deadman et al (1978) s'intéresse au marché Européen des vieux papiers. Leur intérêt était macroéconomique, c'est-à-dire qu'il étudiait si l'introduction de subventions allait faire augmenter la quantité de papier recyclé produit. Toutefois, les structures des marchés européens et américains sont différentes sur

plusieurs points. En Amérique, Franklin (1982) tente de prédire le marché en introduisant les concepts de disponibilité de la matière sous la forme de quantité de papier fabriqué versus le coût d'enfouissement. Cela permet de préciser la quantité disponible théorique de vieux papier par effet de substitution puisqu'un coût d'enfouissement élevé rend plus intéressant le recyclage. Plus tard, les auteurs Berglund et Söderholm (2003) proposent de tenir compte des facteurs de taux d'utilisation — ou de consommation — et de taux de recyclage auparavant difficile et long à calculer pour comprendre le marché. Le lien entre ces facteurs et la quantité de vieux papier sur marché est plus direct que les facteurs proposés auparavant. Cela facilite l'obtention des données et améliore leurs précisions. Dans les années suivantes jusqu'à aujourd'hui, ces deux facteurs proposés ont été confirmés plusieurs fois par l'organisation Moore, experte analyse des tendances du marché du vieux papier, et dans plusieurs ouvrages et études (Forstall (2002), Stawicki et Read (2010) et Villanueva et Eder (2011)).

Du côté de la demande, l'analyse est linéaire sans être nécessairement aisée. L'organisation Moore propose une démarche complète à ce sujet. D'abord, nous tenons compte de la demande totale d'un regroupement de produits génériques similaires aux vieux papiers. Ensuite, il y a la possibilité d'utiliser des produits de substitution. Ainsi nous avons sélectionné le prix moyen d'une pâte vierge particulière ayant sensiblement les mêmes propriétés chimiques que la pâte recyclée. Sans avoir le même degré de blancheur, L'expert acheteur de l'entreprise, supporté par l'organisation Moore, mentionne que les deux pâtes sont interchangeables pour plusieurs produits de papier. Ainsi, le prix du substitut évolue généralement dans le même sens que le prix de la pâte recyclée. Le marché de la pâte vierge étant plus gros, étudié et prédictible que le marché de la pâte recyclée, le prix de ce dernier est un facteur très important à considérer.

Ensuite, l'industrie de la pâte recyclée dépend de la force de l'économie autant du côté de l'offre que de la demande (Stawicki et Read (2010)). Un ralentissement diminue la demande de pâtes recyclées, car la société consomme moins de papier en général. Cela crée aussi moins de vieux de papier pour la même raison. Ainsi, l'économie a un effet sur le prix du vieux papier. Pour insérer ce facteur dans l'analyse, un indicateur national comme le produit intérieur brut de la région a été pris en compte. Le Tableau 2 présente la liste des facteurs externes influents du marché du vieux papier.

Tableau 1.1: Liste des facteurs influents du marché du vieux papier

US virgin pulp price
US recovery
US wastepaper Inventory
US Gross Domestic Product
US and Non-US (for export) Demand

Finalement, puisqu'il s'agit d'un marché représenté par une demande de quelques gros acheteurs, leurs actions individuelles influencent le prix futur. Étant un joueur important, l'usine partenaire à ce projet envoie un signal au marché et le vieux papier devient plus cher lorsqu'elle augmente sa quantité demandée. Ces facteurs ont été intégrés au modèle afin de représenter le comportement du marché. Sa structure et son fonctionnement sont définis dans l'article (chapitre 4).

### 1.2.2 Politique d'achat

Peu d'analyses ont été faites sur différentes politiques contractuelles utilisées dans l'industrie de la pâte recyclée. Toutefois, d'autres secteurs suivent partiellement les mêmes contraintes. Il y a entre autres la fabrication de produits chimiques et la transformation de métaux (voir Kaiser et Tumma (2004)). En général, deux principaux éléments sont considérés : le prix et la quantité. À partir de ces notions, plusieurs politiques contractuelles peuvent être développées. D'abord, il y a l'engagement d'achat ferme qui engage l'acheteur à payer une quantité fixée. Cet engagement assure une stabilité des achats pour le fournisseur moyennant généralement un rabais pour l'acheteur (Grossman Jr, Rohleder et al. 2000). Une version semblable considère une quantité minimum promise sur un horizon de temps. Cela donne plus de marge de manœuvre à l'acheteur, mais les rabais sont moins intéressants (Bassok and Anupindi 1997; Urban 2000). Une troisième version de cette politique contractuelle permet l'ajustement des quantités promises en introduisant le concept de pénalité s'il y a dérogation du plan initial. (Moinzadeh and Nahmias 2000). Ensuite, plusieurs auteurs ont étudié l'option contractuelle de deuxième commande. Il s'agit généralement d'un engagement d'achat ferme, mais le contrat inclut une seconde option pour un deuxième engagement d'achat ferme à un prix moins intéressant ((Cheng, Ettl et al. 2002). Par ailleurs, il est aussi possible de s'entendre seulement sur le prix à payer. En plus des traditionnels prix fixes et variables, il est possible de s'entendre sur un prix plafond et un prix

fixe. Entre ces deux limites, le prix payé est le prix du marché tandis qu'un ajustement sera applicable lorsque le prix du marché est jugé hors des limites.

Actuellement, l'entreprise partenaire utilise la politique d'engagement d'achat ferme avec une limite de prix. Les quantités sont fixées sur une longue période et les prix varient selon le marché avec un rabais-plafond et une prime-plancher. Toutefois, ces conditions ne sont pas toujours respectées. En pratique, le prix payé est toujours celui du prix du marché, car le marché s'avère souvent trop volatil pour supporter les limites entendues. Les quantités fixées sont aussi peu respectées, car il est difficile de contrôler le vieux papier disponible chez le fournisseur. Celui-ci ne peut pas en fournir plus que ce qu'il réussit à collecter. L'utilisation d'une différente politique contractuelle pourrait être applicable, mais certaines particularités de l'industrie complexifient le sujet. En premier lieu, le prix tend à augmenter lorsque la quantité commandée augmente.

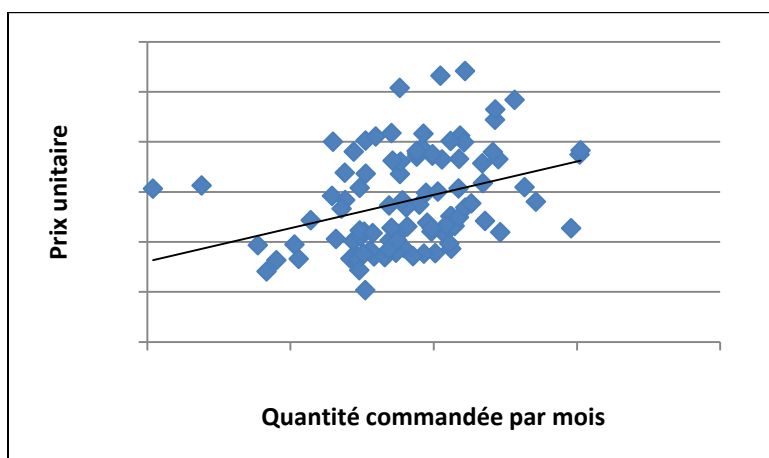


Figure 1.1 Relation entre la demande en vieux papier et son prix unitaire chez l'entreprise partenaire

Comme on peut le voir sur le graphique, la rareté de la matière première inverse la courbe de demande typique. Par conséquent, le concept d'escompte n'est pas applicable. L'accord sur une quantité promise permet plutôt d'assurer en principe l'acquisition de cette quantité et de réduire les risques de pénurie. Cela permet aussi un meilleur contrôle de la qualité des intrants. L'intérêt pour une nouvelle politique contractuelle devrait donc porter sur la flexibilité des quantités.

Par ailleurs, les variations de cadence de production sont généralement importantes dans l'industrie de la pâte recyclée. Cela crée plusieurs problèmes en situation d'approvisionnement fixe. De ce fait, l'entreprise partenaire au projet suit les recommandations de l'organisation

Moore. Celui-ci préconise la stratégie mixte, c'est-à-dire acheter une proportion du vieux papier avec des contrats fixant préalablement les quantités et combler le reste des besoins en achetant sur le marché courant. Cette méthode permet de réduire les problèmes de surinventaire en situation d'arrêt planifié prolongé puisqu'il est possible d'arrêter les achats courants, mais pas les achats fixés sous contrat. Ainsi, l'usine partenaire reçoit une quantité planifiée de vieux papier chaque mois et une quantité variable provenant des opportunités et des besoins identifiés par l'acheteur.

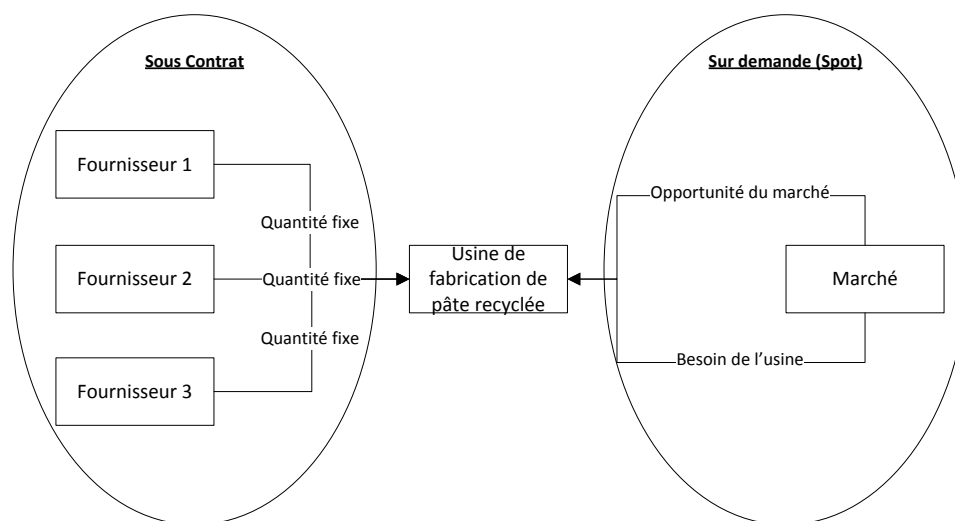


Figure 1.2 : Structure d'approvisionnement en vieux papier suivie par l'entreprise partenaire à ce projet pour l'usine étudiée

Une opportunité « spot » se définit comme une offre d'un fournisseur devant se départir de ses vieux papiers en stock. Un achat courant peut aussi survenir si l'usine a besoin de vieux papier. Dans ce cas, l'acheteur appelle ses fournisseurs et demande une quantité de vieux papier. Tel qu'il a été prouvé précédemment, cela lance un signal au marché et le prix payé sera plus élevé.

### 1.2.3 Politique de gestion d'inventaire

Cette section résume sommairement les différents modèles de gestion d'inventaire traités dans la littérature et développe plus en profondeur la situation de l'usine partenaire à ce projet. Généralement, deux paramètres sont à prendre en compte : « quand commander? » et « combien commander? ». À partir de ces deux décisions découlent plusieurs modèles d'inventaire. Axsäter (2006) résume l'ensemble des politiques génériques, leurs coûts, leurs contraintes ainsi que d'autres concepts clés. Au sujet des questions de « quand? » et « combien? », il mentionne que

l'on peut commander des quantités fixes ou variables à des périodes fixes ou variables. Cela mène à plusieurs modèles d'inventaire dont les plus connus :  $(s,S)$ , le  $(S-1, S)$  et le  $(R,Q)$ .

Au sujet du modèle approprié pour l'industrie de la pâte recyclée, la situation est assez simple. Il s'agit d'un problème à simple échelon avec un seul type de produit. Toutefois, il y a beaucoup de variabilité. Les fluctuations de quantité et de qualité reçue sont très importantes. Ce type de contraintes a été abordé dans la littérature sous plusieurs angles, mais la structure de base utilisée est souvent la même. Que ce soit le modèle initial (Silver, 1975), avec plusieurs fournisseurs (Parlar et Perry 1996), avec l'information incomplète (Atasoy, Güllü et al. 2012) ou autres (Ehrhardt, R. et L. Taube, 1987, Inderfurth et Kelle, 2011), on utilise généralement le modèle d'inventaire  $(s,S)$ , c'est-à-dire un niveau d'inventaire cible à atteindre ( $S$ ) et un point de commande ( $s$ ) vérifié à période fixe. Ce point de commande peut être défini de plusieurs façons. Un des plus connus est celui cité entre autres par Jacobs, Chase et al (2009) qui consiste à prévoir en stock la demande moyenne pendant le délai de livraison ainsi qu'un stock de sécurité qui dépend du niveau de service désiré.

Dans le cas de l'usine partenaire étudiée, on suit partiellement cette politique. Puisque le vieux papier est une matière cruciale, la révision est périodique et généralement fréquente. Le stock de sécurité est très élevé pour la même raison. L'entreprise préfère payer plus de frais de stockage et ainsi éviter la pénurie qui arrêterait complètement la production. Ensuite, l'inventaire cible n'est pas nécessairement respecté. Il s'agit plus d'un indicateur que d'une cible puisque l'acheteur peut profiter d'une situation favorable sur le marché des vieux papiers pour acheter des matières premières même si les stocks sont au-dessus de l'inventaire cible. La situation inverse est aussi possible. Ce comportement particulier représente une partie importante et influente de la gestion des inventaires et des achats de l'entreprise partenaire.

## CHAPITRE 2. MÉTHODOLOGIE

Cette section présente la démarche suivie ainsi que les étapes méthodologiques réalisées au cours de ce projet. Grâce à l'ensemble des concepts théoriques et des notions pratiques reliés à l'usine étudiée et à l'industrie du papier recyclé présenté précédemment, un modèle représentatif des processus d'achat et de production d'une usine de fabrication de pâte recyclée a été développé et configuré en collaboration avec l'entreprise partenaire au projet. Plus précisément, nous avons conçu des modèles du marché des vieux papiers, de l'usine, et de ses principaux fournisseurs. Avec comme activité centrale l'achat du vieux papier, le modèle global est constitué d'un côté de la demande de vieux papiers venant du flux de production. Ce flux de production commence par un plan de production calculé à partir de l'historique de production de l'usine étudié et se traduit par un besoin en vieux papier soumis à un gestionnaire des approvisionnements. De l'autre côté, une offre de vieux papiers venant du marché et des fournisseurs a été introduite. Influençant autant le prix du vieux papier que les quantités disponibles, ce marché est représenté par un modèle mathématique composé de plusieurs facteurs variant chaque jour. Ensuite, l'interaction critique entre le gestionnaire des approvisionnements et le marché des vieux papiers a été introduite sous forme de comportement d'achat influencé par les besoins de production et les opportunités perçues sur le marché.

Le modèle a été implanté dans le simulateur multi-agent Netlogo. L'objectif était de rapprocher ce modèle de la réalité en émulant un réel processus d'approvisionnement. Ainsi, les données et les paramètres utilisés sont fondés sur des informations recueillies au travers des entrevues, des experts du domaine, des rapports d'entreprise et des progiciels de gestion intégrée (ERP) de l'entreprise partenaire. Le tableau en annexe 1 explique en profondeur la méthodologie utilisée, c'est-à-dire la façon dont ils ont été collectés et calculés. Plusieurs expériences préliminaires impliquant des milliers de simulation ont été conduites afin d'ajuster certains paramètres dans le modèle. Ensuite, une série de 30 essais a permis de valider le bon fonctionnement des composantes, dont le comportement d'achat particulièrement. Cette validation s'est faite à partir d'indicateurs de coût (fixe, semi-fixe, variable, achat, entreposage), d'inventaire (inventaire moyen, variation d'inventaire) et de qualité (nombre de défauts) calculés pendant la phase de validation et étudiés pendant la suite du projet. De plus, une analyse spécifique plus poussée a été faite pour valider le bon fonctionnement du modèle du marché. Le comportement du marché

simulé pour le modèle a ainsi été comparé avec le comportement historique réel entre 2001 et 2012. Au terme de cette étape de validation, nous avons une simulation reproduisant fidèlement le processus d'approvisionnement et de production d'une usine de fabrication de pâte recyclée ainsi qu'un comportement d'achat se rapprochant du comportement observé chez l'entreprise partenaire.

Pour répondre aux objectifs de ce mémoire, un plan d'expérience a été bâti et les indicateurs de performance définis auparavant pour la phase d'expérimentation. L'expérience portant sur l'optimisation de politiques d'achat et opérationnelles testait quatre décisions stratégiques : la cadence planifiée (c.-à-d. le niveau de production ciblé), la flexibilité de la production (c.-à-d. la variation du niveau de production acceptée), l'inventaire cible et l'introduction de termes contractuels flexibles. Il a été jugé en collaboration avec l'entreprise partenaire que ces politiques représentaient les choix affectant le plus la production et l'approvisionnement. Le plan d'expérience réalisé était un plan factoriel complet  $3^3 2^1$ , c'est-à-dire 3 facteurs à trois modalités et un facteur à deux modalités. Les valeurs des modalités étudiées ont été définies selon la situation actuelle ainsi que les extrêmes possibles. Les limites expérimentales proviennent des limites physiques ou réalisables de l'usine étudiée (par exemple, la plus basse/haute cadence possible). Cela assure une bonne couverture de la région expérimentale et permet de bien comprendre l'effet de chaque facteur. De plus, certaines conclusions peuvent être tirées de ces extrêmes. Finalement, l'étude de stratégies nécessite un long horizon de simulation. C'est pourquoi la taille de l'horizon des essais a été fixée à 7 ans. Les résultats étant souvent très variables, 35 répétitions ont été nécessaires pour assurer l'élimination de ces écarts. Dans le cadre de ces expériences, 1890 simulations ont ainsi été réalisées, en plus des simulations nécessaires à la configuration et validation du modèle global.

Après cette première série d'analyses, le comportement contrôlant les inventaires excessifs dans la simulation (l'outil *purchase control policy* dans l'article) n'était pas nécessairement représentatif de la réalité et pouvait influencer certains résultats, particulièrement l'utilisation des contrats flexibles. C'est pourquoi une deuxième série d'expériences a été conduite sans ce comportement afin de comparer les résultats en cas de différentes conséquences. Ainsi, 35 nouvelles répétitions ont été rajoutées au premier plan d'expérience, pour 1890 simulations supplémentaires (un total de 3780 essais).

## CHAPITRE 3. WASTE PAPER PROCUREMENT OPTIMIZATION: AN AGENT-BASED SIMULATION APPROACH

### 3.1 Introduction

The recycled pulp and paper industry is a closed-loop supply chain (Figure 3.1), which differs significantly from traditional supply chains (Carr and Appleton, 1990). Because they used to be considered as less valuable, closed-loop supply chains challenges are just beginning to be more widely addressed in the literature. Like other closed-loop industries, many fundamental issues of the recycled pulp and paper industry remain partially solved at best. This introduction section proposes an overview of some of these challenges, including the specific problem addressed in this paper.

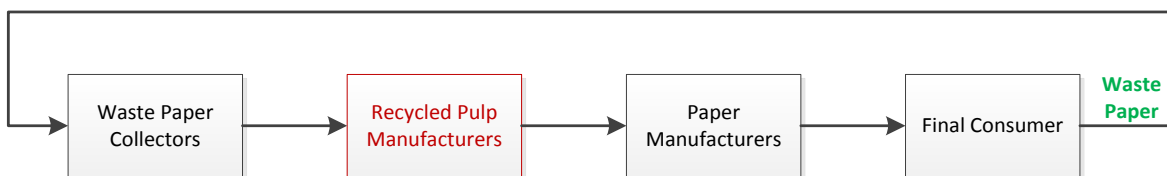


Figure 3.1: Main processes of the recycled pulp and paper industry

#### 3.1.1 The recycled pulp and paper industry

In the recycled pulp and paper industry, raw material includes various types and quality of waste papers. Among many issues to be addressed, waste paper procurement is one of the most critical as it represents over 40% of total cost. Waste paper is an end-of-life material generated by the use of papers, virgin or recycled products, which are collected and partly sorted. The main finished product is recycled pulp. In order to be considered usable in pulp production process, recycled pulp must meet several chemical constraints. However, in order to have high commercial value, there are important aesthetic constraints to meet, including pulp brightness. The producers' objective is to produce a product with the right brightness for the specific use of their customers. One way to improve brightness is to use various chemical processes, which have fairly predictable but limited effect. Brightness is mainly a function of the waste paper composition, including the type of fibre. The higher the content of ground wood fibre, the lower the brightness of the finished product will be.

Waste papers are industrial wastes, which contents and characteristics vary widely. More specifically, there are two types of variations: inter-type and intra-type. On the one hand, in order to reduce the intertype variability, the industry has developed segregation charts based on specific characteristics (physical, end-user type, location, etc.) to classify collected bales of waste paper. By combining these aspects, 52 standard grades were created and are now used in North America. These charts allow recyclers to better understand the type of raw materials they purchased. Each grade has different properties, which help to define approximately its quality, including its brightness value. The composition of each grade also defines its price. Therefore, depending on the current purchasing price of each grade and the targeted brightness of the finished product, a grade can be more valuable than others. Unfortunately, these grades still contain much variability, because waste papers are poorly sorted when initially disposed of in office buildings and private homes. Perfect segregation at the point of generation is difficult, if even possible. Consequently, some form of testing and sorting is generally recommended and contract agreements are often necessary to define content restrictions in every purchased grade.

On the other hand, intra-type variability leads to various brightness values thanks to fibre variations. Indeed, fibre mix can vary between two simple white sheets considered identical. It is therefore difficult to reduce intra-type variability because of physical limitations.

The procurement of waste papers can be done through contracts or spot market. A company's capacity to take advantage of both approaches depends on the waste paper market, which has a complex structure. Several important buyers and suppliers influence the waste paper market. In addition, waste paper supply is not unlimited. Its availability depends on various factors including generation rate, recovery rate, and seasonality, which lead to volatile prices.

In this paper, we focus on the recycler and its relationship with waste paper collectors. A recycler is generally constituted of a production line with various sequential machines (Figure 3.2). This process can produce different pulp qualities from few different waste paper grades, according to several recipes. For instance, to produce quality FP1, the corresponding recipe R1 is the recommended mix of each input grade. The goal of the producer is to minimize procurement cost while meeting a minimum level of brightness. Therefore, production control includes controlling the input mix as well as the chemical whitening of the pulp.

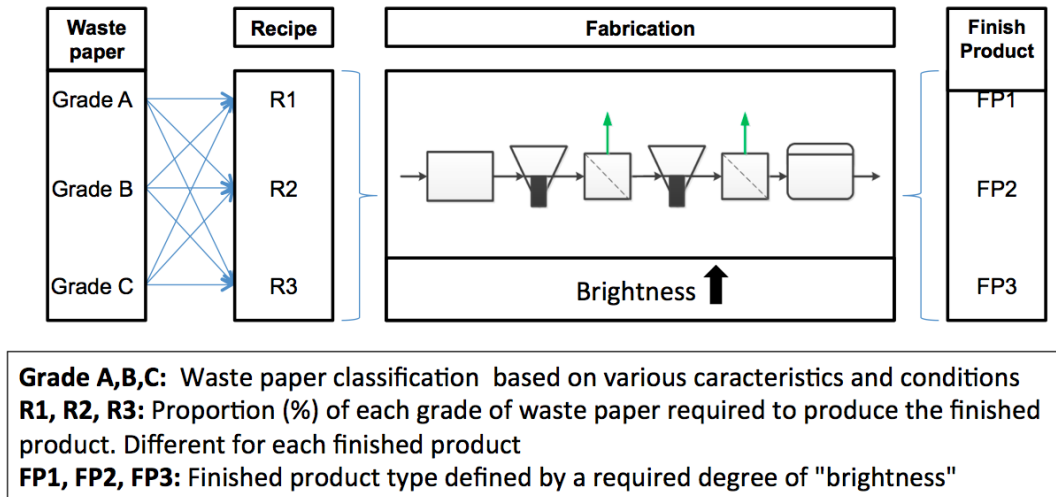


Figure 3.2: Recycled pulp production processes

This production process operates continuously since the cost of a shutdown and a restart is high. Temporary downtimes are planned over several days for maintenance. Furthermore, managers can adjust production rate and input mix (i.e., recipes/campaigns) according to demand, pulp market conditions and inventory levels. In turn, the procurement strategy must be adapted in order to meet production input mix and consumption requirements. In practice, production efficiency is affected by procurement policies and vice versa. For instance, a high production rate improves operational performance, but creates waste paper scarcity problems. Along the same line, procurement policies, such as purchase commitments and contracts, reduce purchase cost, but can impact production flexibility by affecting available grade mix. Therefore, production and procurement policies must be analyzed and optimized altogether.

This paper aims to study this coordination problem and optimize procurement without impairing production flexibility. More specifically, this study aims at optimizing procurement strategy by assessing the value of different purchasing policies in the context of various production rates and flexibility levels. To do so, an agent-based simulation approach is used.

### 3.2 Literature review

The coordination of procurement and production activities is an essential part of supply chain management, as suggested by Bhatnagar *et al.* (1993). However, rapidly evolving and changing conditions make such a function a complex challenge for managers. Recycled pulp and paper producers face such a challenge. For instance, paper utilisation decreases world wide, which

reduces waste paper availability. Along this line, the decreasing fibre content in virgin paper has also a negative impact on recycled fibre availability. Recycled paper producers must therefore buy more waste paper to maintain their production output. When combined with growing global competition, these challenges lead to increasing waste paper demand and to volatile market prices and availability, threatening their profitability. Consequently, this industry needs to assess and optimize their procurement strategies.

Supply chain management and procurement decisions are often supported by traditional optimization technics, such as mathematical programming, inventory theory, and other mathematical optimization tools, including robust and stochastic optimization. The interested reader is referred to Dekker *et al.*, (2012) for a recent review of OR application in the domain of green logistics. These ever improving tools are capable of identifying optimal decisions in specific, and even uncertain, conditions. However, although they are highly effective tools for optimizing decisions, their modeling paradigm cannot yet deal efficiently with complex situations with large amounts of concurrent events and decisions influencing each other with feedback loops and emerging phenomenon. These challenges are generally the domain of applications of simulation, which is the tool used in this paper.

Simulation is used in stochastic and dynamic contexts in order to identify patterns and tendencies, which is often more essential than finding an optimal solution (Davidsson *et al.*, 2007; Lomi and Larsen 1996; Moss and Edmonds 2005). Cartier and Forgues (2006) identify the advantages of simulation for applied management sciences and its role to better understand behaviours and interactions in complex systems. In addition, simulation allows managers and researchers to visualize a problem in terms of inter-related elements. The interested reader is referred to Gilbert and Troitzsch (2005) for an extensive presentation and a review of simulation tools, such as cellular automata, multi-agent models and discrete event models.

In particular, agent-based simulation (i.e., ABS) is used in various disciplines, from ecology, social science, to engineering, in order to better understand dynamic and complex systems such as supply chains (Siebers 2010; Frayret 2011; Barbati *et al.* 2012). More specifically, it focuses on the interactions of several heterogeneous agents, which have the ability to make their own decisions and act autonomously according to their environment and their interactions with other agents (Charles and Michel 2006; Macal *et al.*, 2010). ABS can reproduce emerging behaviours

and supply chain patterns in order to study them (Moyaux *et al.*, 2007; Bahroun *et al.*, 2010, Farnia *et al.* 2013). Also, Bollinger *et al.* (2012) identify three advantages of ABS for supply chain optimization. First, ABS can individually simulate discrete entities with unique and heterogeneous properties and behaviours. Second, it enables explicit near real-world representations of systems. Third, ABS can emulate the behaviour of real-world actors.

Although, to our knowledge, ABS has never been directly applied to the recycled paper industry, it has been used in many contexts to optimize supply chain coordination problems. Barbati *et al.* (2012) identified no less than 66 academic contributions in six different families of supply chain applications. More specifically, Pěchouček and Mařík (2008) reviewed some of these functionalities, which include demand forecasting (Liang and Huang 2006), production and quality control (Castellini *et al.* 2011), inventory control (Kim *et al.* 2010), supply chain coordination (You and Kumar 2006; Frayret *et al.* 2007, Gaudreault *et al.* 2012), scheduling (Lau *et al.* 2006), supplier selection (Valluri and Croson 2005), supply chain decoupling point position (Cid *et al.* 2009). Concerning the procurement process, Jie and Li (2008) built a generic procurement and inventory process inside a discrete-event simulation. Although their model is rather simple, it reveals the basic components and attributes required. Along this line, Allwood and Lee (2005) proposed a competitive agent-based simulation model of a factory and its customers and suppliers in order to optimize strategic decisions and procurement strategies. Although their study proposes a relevant supply chain model and interesting strategic policies in terms of inventory and suppliers selection, it focuses on the comparison of competitive and non-competitive agents. Their model takes into account the adjustment of purchased quantities based on market price changes. However, it does not consider the possibility to adjust production strategies according to market price variations. In addition, these market price variations are randomly set between specific limits, and are therefore not affected by the plant's production strategy, which is the case in the context of a large recycled pulp producer. Similarly, Uppin and Hebbal (2010) propose an ABS model, which includes purchasing activities. However, there is no dynamic interaction between suppliers and the buyer. Furthermore, the market is not sensitive to the agents' decisions.

Concerning the waste domain of green logistics, some researchers propose ABS applications of closed-loop supply chains. For instance, Axtell *et al.* (2001) promote the use agent-based simulation in a context of industrial ecology and identify several potential advantages. Such a

model was later developed in Cao *et al.* (2009) in order to study the evolution of eco-industrial parks . Similarly, Bollinger *et al.* (2012) developed an agent-based model in the mobile phone recycling context that has similarities with the recycled paper industry. Indeed, it includes the same constraints of raw material variations, collection and recovery rates and secondary market. Their simulation model consists of a mobile phone closed-loop supply chain with manufacturers, recyclers, collectors, refurbishers and a global market. While this model aims to gain insights into the emerging patterns of material flows through out the supply chain, our contribution focuses on a specific manufacturer and focuses on its specific and complex procurement process in order to optimize it. To our knowledge, there is no ABS model dedicated to the study of production-procurement coordination in the domain of recycled pulp production. The next section presents our agent-based simulation model.

### **3.3 Simulation Model**

This section first provides a general overview of the model developed. The next section gives a detailed description of each agent and attributes.

#### **3.3.1 General Overview**

The proposed model deals with the upstream supply chain of a recycled pulp producer. It includes three groups of actors: (1) a group of selected suppliers; (2) a market representing some contextual factors of the industry and a set of prices; and (3) a recycled pulp producer, which contains several sub-components (Figure 3.3). Physical materials (waste papers of various grades) converge from suppliers to the production line, through several processes including sorting, storage and production. Recycled pulp sale is not included in this model because the objective of this study focuses on the coordination of procurement and production processes, and assumes that pulp is sold once produced without delay although it is not the case in practice. Indeed, recyclers have adopted a push production flow (i.e., make-to-stock). Hence, the objective of the recycler is to meet the production plan, rather than meet specific orders.

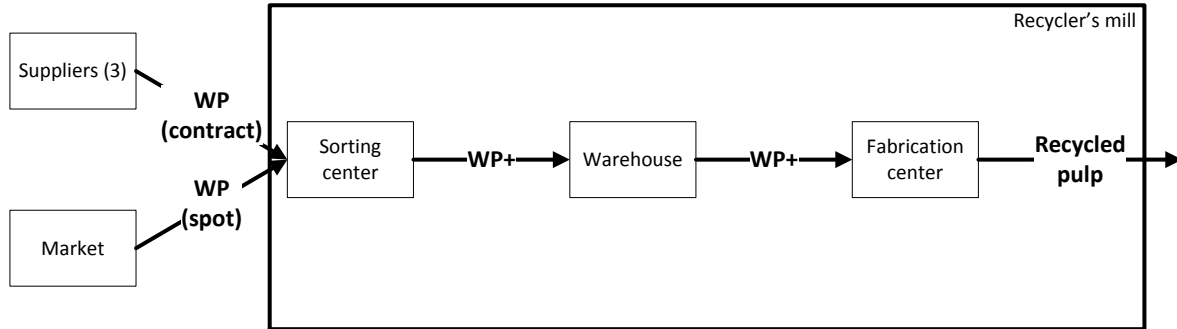


Figure 3.3: Model overview

The procurement process of the recycler consists in buying waste paper bales according to market conditions, inventories, production requirements and contractual agreements with suppliers. In the proposed model, bales are modeled as aggregated lots with an extrinsic quality, which corresponds to the average quality of the tagged grades. They have also an intrinsic quality, which is the actual average quality of the bales. It is assumed to be unknown by the recycler (only the extrinsic quality is known). Along the same line, this model assumes that part of the required waste papers is supplied through contractual agreements with suppliers signed before the start of the simulation. The rest is supplied directly from the spot market to either take advantage of opportunities or to meet unexpected needs.

Upon delivery at the mill, waste paper lots are controlled for quality inspection, and reclassified if needed. In the proposed model, this process results in either an adjustment of quality, or a rejection of a proportion of the waste papers according to the quality performance of the corresponding supplier. Next, the fabrication center selects the required waste paper grades and transforms them into a finished product. Because in the model the input brightness is uncertain, the output brightness is also uncertain.

Concerning the flow of information used in the simulation model (Figure 3.4), it follows the opposite path of the material flow. At the beginning of the simulation, a production plan is generated for the next three months (simulated time). This plan is updated every month, by adding at the end of the current schedule, a new month of production. A production plan consists of a list of batches of final products to be produced every day (i.e., production orders, PO). The operation manager uses this information to convert these PO into waste paper requirements according to specific recipes. Next, these requirements are sent to the warehouse manager. In turn, the warehouse sends the quantities requested to the production center and informs the

operation manager of the inventory level. The procurement manager also receives different operational information from the operation manager including the target inventory. Finally, when a PO is completed, its final quality is calculated in the model according to its intrinsic quality as well as the production conditions, as described in equations (1) and (2):

$$FQ = \sum_{j \in J} P_j Q_j + U \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} P_j = 1 \quad (2)$$

with,  $FQ$  being the final brightness (based only on intrinsic brightness),  $P_j$  is the proportion of the waste paper grade  $j$ ,  $Q_j$  is the current intrinsic brightness of the waste grade  $j$ ,  $U$  is the brightness gained from chemical processes, and  $J$  is the set of waste paper grades introduced in the fabrication process.

This final quality is then sent to the operation manager who labels the final product.

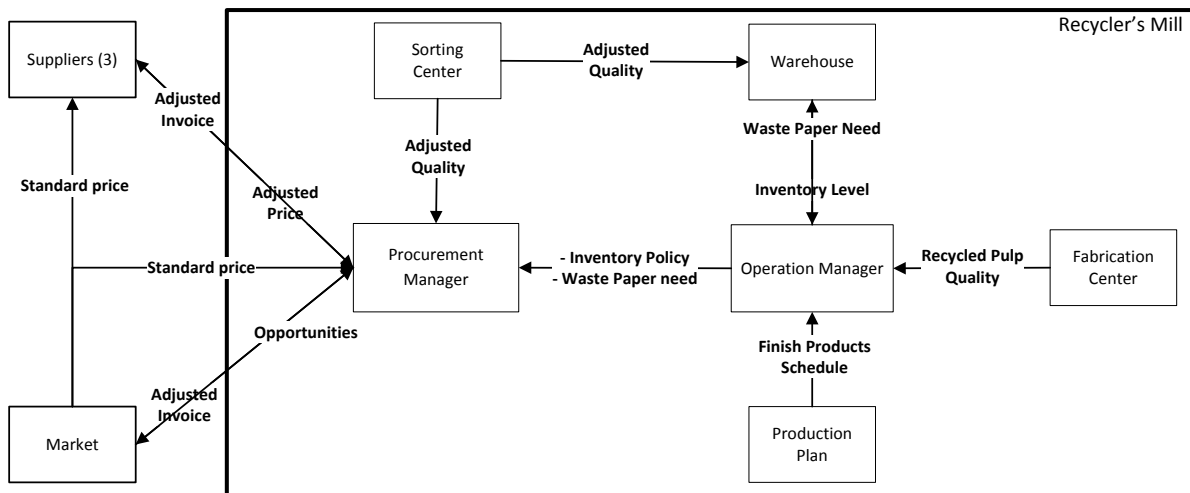


Figure 3.4: Information flows

A second information flow starts from the waste paper market (Figure 3.4). The simulation model calculates a daily base price for each waste paper grade, which is sent to the suppliers and the procurement manager. According to daily available waste paper quantity, which is represented by the US waste paper inventory (i.e., historical data), the market sends available opportunities to the procurement manager. In practice, suppliers inform individually the procurement manager of available quantities of waste paper to purchase. Next, according to all available information (i.e., inventory levels, available spot market waste papers, target inventory levels, production plan), the procurement manager decides how much (if any) to buy from the spot market. In other words,

this procurement process is modeled as a bulk process, in which the procurement manager agent buys a portion of all available quantities according to a specific decision process. Once all necessary information is exchanged, the market and the suppliers deliver the agreed quantities of waste paper to the sorting center. Upon delivery, the delivered lots of waste paper are partially sorted by the sorting center, which controls the quality and updates the quantity and extrinsic quality information of the lots received. This information is sent to the warehouse to update inventory information and to the procurement manager to add accordingly a rebate to incorrect invoices in case of unmet quality agreements.

### **3.3.2 Model description**

This section describes the different components (passive entities) and agents (reactive and proactive entities), as introduced in the previous sections.

#### **3.3.2.1 Procured Material and Final Products**

Lots of waste paper are described by their average intrinsic and extrinsic quality, and their cost per ton, as defined by the market, and their average extrinsic quality. The recycle pulp is defined by its type, its required quality, its recipe, its final quality and its total cost.

#### **3.3.2.2 Market Agent**

The waste paper market agent represents, in an aggregated manner, all suppliers from which the recycler can purchase spot market quantities of waste paper. Its main role is to define a standard price for every simulated day, which is used to compute the price of each grade. In practice, the waste paper market is a complex system that is influenced by many factors. Domain experts and industrial reports from Moore, the American Forest and Paper Association, the Paper Recycling Association and RISI<sup>1</sup> provide in-depth information about the waste paper market. Before developing a market agent, we used Statistica (StatSoft) and Forecast Pro (Business Forecast Systems, Inc.) to analyze this information, as well as procurement reports from our industrial partner. Using regression analysis, we identified 6 factors from which we were capable of

---

<sup>1</sup> Resource Information Systems Inc.: <http://www.risiinfo.com/>

computing the market price estimate within an acceptable margin of error. These factors includes 5 external factors, the US virgin pulp price, the US recovery volume, the US waste paper inventory, the US gross Domestic Product, the US and non-US demand, as well as one internal factor, the volume of waste papers purchased by the recycler in the last 30 days, which is large enough to influence market price. A mathematical model reproducing the waste paper market behaviour was built with these factors. This model takes the form of a multiple linear regression equation, in which waste paper deliveries has the biggest effect. In the context of the simulation, the 5 external factors are defined a priori for each day of the entire simulation horizon. However, agents in the simulation become aware of their value at the end of each simulated day.

### **3.3.2.3 Contractual Suppliers Agent**

The waste paper market in North America is made up of a few major companies responsible for collecting and distributing waste papers in most American cities. In this model, suppliers are rather simple reactive agents. First, suppliers have different characteristics in terms of logistics and cost. Each has a specific set of service quality indicators, including quantity (i.e., ability to supply the required quantities (in %)), quality (i.e., ability to provide the required quality (in %)), lead-time, and a supply capacity (i.e., maximum waste paper available). Their characteristics also include a delivery cost per ton and a price index, which represent an adjustment with respect to market price (in +/-%). In this study, three suppliers with different attribute values were developed. The simulated process is rather simple. Every simulated day, they receive the market price and adjust their prices according to their price index. Next, they send invoices and quantities as stated in the contractual agreement with the recycler. After quality assessment carried out by the sorting center, which simply accepts, downgrades or rejects, and, if needed adjust their invoice accordingly.

### **3.3.2.4 Procurement Manager Agent**

Next, the procurement manager agent is responsible for purchasing waste papers on the spot market, which is captured in the proposed simulation model as an aggregate decision process that defines the daily quantities purchased by the agent. One of the challenges of this simulation model is to emulate the actual behaviour of the procurement manager.

Inventory management in this industry is generally a continuous review system with a reorder point calculated as the quantity of material required for a given number of days of production. However, because waste paper is a commodity with a volatile price, the purchase manager in practice may delay, or conversely, accelerate the purchase of waste paper according to his forecast of market conditions. Therefore, this simulation model proposes a procurement manager agent capable of not only reacting to inventory level variations with respect to some inventory target, but also capable of adjusting its procurement decision according to market conditions. In other words, the proposed procurement manager agent uses a decision process in order to make aggregate purchase decision according to the inventory level and by assessing whether the market price of the day is advantageous with respect to its forecast. Consequently, the procurement manager agent may buy unrequired waste papers on the spot market because of good market conditions, or conversely, not buy needed waste papers in poor market conditions thank to its ability to deal with risk of shortage.

As mentioned earlier, quantities of waste papers are also delivered from contractual agreements. However, unless characterized as flexible, these contractual agreements involve standard deliveries of waste papers (i.e., fixed with a random noise with respect to quantities and qualities) that only influence procurement decisions through inventory level variations.

In brief, the procurement manager agent uses a decision process that emulates an aggregate discretionary process of buying a portion a bulk offers from the spot market. This discretionary process is based on two factors. The first factor aims to achieve a specific inventory level target, regardless of the grade, that is calculated by the operation manager agent. In other words, the general behaviour of the procurement manager agent is to buy less on the spot market if the inventory level is above the inventory target, and conversely if the inventory level is lower than the target. This simple behaviour is influenced by two parameters. First, we define  $\alpha$  to describe the intensity of his purchasing behaviour. A higher value of  $\alpha$  means a higher probability of accepting an opportunity from the spot market. When the current inventory level matches the inventory target,  $\alpha$  represents the standard purchasing probability. Next, we define  $\beta$  to describe the behaviour of the procurement manager agent with respect to the risk to shortage. For instance, an experienced buyer might accept some level of risk of shortage because his market forecast is advantageous. In contrast, another buyer might always aim to achieve inventory target whatever the market condition. These behaviours only differ by different capacity to deal with risk. A risk-

seeker agent has a higher  $\beta$  than a risk-averse agent. Therefore, we define the portion  $F$  of bulk offer to purchase with respect to inventory as:

$$F = \frac{\frac{\pi}{\alpha \times 100} - \arctan\left(\frac{\beta}{\gamma}\right)}{\pi} \quad (3)$$

with  $\beta$  is a risk level parameter, and  $\gamma$  is a ratio indicator between the target inventory and the current inventory level and is defined by equation (4).

$$\gamma = \frac{\text{current inventory} - \text{target inventory}}{\text{target inventory}} \quad (4)$$

Figure 3.5 and Figure 3.6 illustrate respectively the impacts of  $\alpha$  and  $\beta$  on  $F$ .

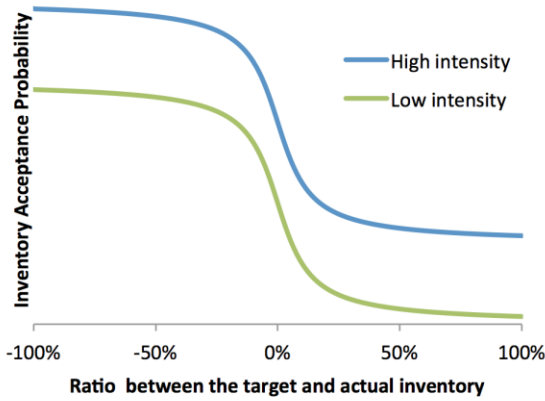


Figure 3.5: Impact of  $\alpha$  on the probability of accepting an offer.

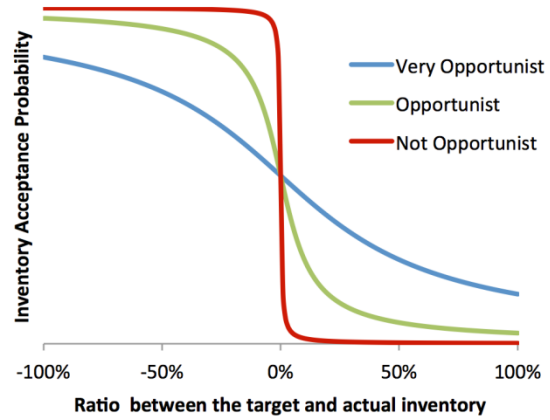


Figure 3.6: Effect of  $\beta$  on the probability of accepting an offer.

The second factor influencing the procurement manager agent concerns market condition. It is based on a similar process. In other words, we define a second variable describing the portion of bulk offers to buy with respect to market condition. In practice, the procurement manager receives daily the current market price, and forecasts this price for the next few months with a certain degree of error. Because the procured quantities bought by the procurement manager influence market condition, we developed a method of emulating this forecast process that takes into account future purchase order of waste paper. This information can easily be computed based on the production plan sent by the operation manager and the production recipes. However, in order to emulate and control the forecasting error of the procurement agent, we introduced a

random noise factor that emulates his more or less accurate ability to forecast the external factors influencing the market price. In other words, we used the a priori defined values of these factors, and introduced a random variation around these values within a specified range, and input these forecasted values directly into the multi-linear regression model of the market price. Because, the value of the variables used to calculate the market price and the market price forecast are different, the price and its forecast are similarly different. Both are different, also because the procurement manager agent uses future purchase quantities based on the production plan, while the market price model used the past 30 days of purchase. Using historical data from the partners' ERP, we computed the actual forecasting error and reproduced it by fine-tuning the noise factor.

Next, in order to emulate the ability of the procurement manager to take advantage of a forecasted good market condition, we introduced two parameters, respectively  $\rho$  and  $\tau$ , in order to model the standard acceptance level and the risk level, and defined in equation (5). These parameters directly influence portion  $G$  of bulk offers to buy with respect to market condition.

$$G = \frac{\frac{\pi}{\rho \cdot 100} \arctan\left(\frac{\tau}{v}\right)}{\pi} \quad (5)$$

with  $\rho$  is a standard acceptance parameter,  $\tau$  is a risk level parameter, and  $v$  is a ratio indicator between the forecast price and the current price and is defined by equation (6).

$$v = \frac{\text{forecast price} - \text{current price}}{\text{current price}} \quad (6)$$

Next, in order to take both  $F$  and  $G$  into account, we experimented with different approaches. In order to emulate the observed behaviour of the procurement manager, who gives more importance to avoiding shortage situations, the portion  $P$  of bulk offers to buy with respect to market condition is the maximum between  $F$  and  $G$  as defined in equation (7). Furthermore, we defined a safety stock level below which, the procurement manager agent purchase all available waste paper volumes.

$$P = \max(F, G) \quad (7)$$

This aggregation function leads systematically to a higher portion of bulk buy in shortage situations, even if market condition is poor. However, it leads to over buying in situation of good market condition, which is observed in practice. In order to avoid such situations, the operation manager has the authority to freeze the purchasing process until the inventory goes down to the

target level. Unfortunately, in practice, this authority is not systematically exercised, which leads sometime to high inventory. Therefore, in order to take this aspect of the general decision process into account, we develop an optional process model in which any purchase decision is systematically overruled if the warehouse cost associated with the aggregate purchase of the day is higher than the saving it generates. In the experiments described later, both options (with or without the purchase control policy) have been evaluated.

Finally, the last part of the decision model aims at determining the specific quantities of waste papers to buy from the spot market. Like many other industries, supplies of waste papers are limited. Scarcity affects quantities available every day. In order to approximate waste paper availability, we assume that the procurement manager agent can buy everywhere in the United States, which was confirmed by domain experts. Therefore, we assume that the US national waste paper inventory (i.e., historical external factor) represents the quantity offered to the procurement manager at a given time. The daily purchased quantity  $O$  is obtained by including the portion of bulk buy in the equation (8):

$$O = (B - D) * P \quad (8)$$

with  $B$  is the US waste paper inventory, and  $D$  is the daily quantity delivered by contract.

Concerning the grade, the procurement manager agent purchases a proportion of each grade available according to the corresponding production requirements. This grades mix is calculated by the operation manager agent. For simplification purposes, it was assumed that the same grade mix is purchased from every supplier.

### 3.3.2.5 Sorting Center Agent

According to what was bought by the procurement manager agent, lots of bales are delivered and processed by the sorting center agent, which simulates the behaviour of the sorting center by adjusting the quality or the quantity of the lots received. Every simulated day, the sorting center agent sorts each lots delivered and partially reevaluates their quality. During sorting, two actions are carried out. First, the sorting agent can downgrades a proportion of high grades to a lower grade if quality is found below a given level. Next, it can reject a quantity of the lots if it is unusable. Downgrade and rejection rate are specific to each supplier. However, this process is

simulated by introducing a random noise in order to emulate observed data. Next, controlled lots are sent to the warehouse.

### 3.3.2.6 Warehouse Agent

The warehouse agent is a simple reactive agent. It receives lots of waste paper from the sorting agent and forwards them to the fabrication center when instructed by the operation manager agent. In practice, the warehouse consists of different storage spaces with specific logistics and cost characteristics. For example, the first storage space is in front of the first machine. Its cost is low and its capacity is very small. Other spaces are available at different handling, delivery and storage costs depending on their location and efficiency. In practice, the partner occasionally uses external warehouse for a higher cost. We define the warehouse cost of a given storage space by equation (9), and the total warehouse cost by equation (10):

$$W_i = L_i + H_c + I_i * (Inv_i/Cons) + O_c * (Inv_i/Cons) \quad (9)$$

$$Warehouse = \sum_{i \in I} W_i \quad (10)$$

with  $W_i$  is the warehouse cost per ton of waste paper (i.e., \$/ton) of storage space  $i$ ,  $Warehouse$  is the total warehouse cost per ton of waste paper (i.e., \$/ton),  $I$  is the set of all storage space,  $L_i$  is the delivery cost (i.e., \$/ton) of storage space  $i$ ,  $H_i$  is the handling cost (i.e., \$/ton) of storage space  $i$  and includes both handlings to and from the warehouse,  $I_i$  is the daily inventory holding cost (i.e., \$/ton per day) of storage space  $i$ ,  $Inv_i$  is the waste paper inventory level (i.e., ton) of storage space  $i$ ,  $Cons$  is the average waste paper daily consumption (i.e., ton per day), and  $O_i$  is the opportunity cost (i.e., \$/ton) of storage space  $i$ .

### 3.3.2.7 Operation Manager Agent

The operation manager agent is responsible for computing and distributing certain information between all agents. First, it computes the optimal recipe in order to produce the planned production batches. In other words, recipes can change according to market price. In order to find the optimal recipe, a small mathematical programming problem was developed in order to minimize purchasing costs with respect to quality, inventory and production constraints (e.g., a maximum level of specific grades). However, because the optimal recipe is not constant, it creates different waste paper requirements through time. In order to take this variability into

account, the operation manager keeps a list of the last 30 days of production requirements. Every day, the operation manager agent updates this list by adding the new requirements of the day. Then, it forecasts the next requirement for each grade by averaging the requirements of the last 30 days. Finally, it sends the adjusted requirements per grade to the procurement manager. This process aligns procurement with the changing needs of production while taking into account the impact market price variations on recipes.

Once the recipe is computed, the operation manager agent computes the quantities of each grade of waste paper to be delivered to the fabrication center, and send these quantities to the warehouse. Inventory levels are adjusted accordingly. This information is also used to compute the target inventory and sent to the procurement manager agent. Next, the operation manager agent receives information about daily deliveries of waste papers, and updates the inventory levels of each grade according to the quality information sent by the sorting center agent.

Finally, the operation manager agent evaluates the quality of the finish product and labels it according to the actual brightness computed using the average intrinsic quality level of the lots of bales used in the fabrication process. In practice, brightness is measured automatically at the end of the fabrication process. It is a direct consequence of the intrinsic quality of the bales.

### **3.3.2.8 Fabrication Center Agent**

The fabrication center agent is a reactive agent that simulates the production processes that transform lots of waste papers into tons of recycled pulp. For simplification purpose, the production is considered to be a single machine with a variable effectiveness and a single input. The agent starts the simulation in a passive state, while waiting for waste paper to put in the machine. Then, it transforms in a bulk process the waste paper input that day into several tons of recycled pulp. This process first consists in computing the weighted average brightness of these lots, and then in increasing this average by a given number to represents the bleaching process. Therefore, the agent's ability to meet the minimum brightness of the finished product depends only on the intrinsic quality of the specific paper used. Also, the agent is characterized by a set of attributes, which include a variable cost (i.e., \$ per ton), a fixed cost (i.e., \$/day), a yield (i.e., quantity of raw material needed to make a ton of finished product, %), and effectiveness indicators with respect to quantity (i.e., ability to produce the planned quantity, %) and quality (i.e., ability to produce the planned quality, %).

## 3.4 Methodology and experiments

This section first discusses the implementation of the agent-based simulation model. Next, the method used to setup and validate the model is presented. Finally, the various experiments carried out with the simulation model are presented.

### 3.4.1 Model implementation

Several agent-based simulation platforms are available to implement the model described above (Frayret, 2011). Generally, these platforms can be classified according to two characteristics: required programming expertise and modeling flexibility. In the model, all agent interactions are simple, and agents' behaviour is either reactive or relatively simple. In addition, researchers involved in the project have various backgrounds and expertise. For these reasons, *Netlogo* was selected, as it has an intuitive interface and a simple yet powerful language that is flexible enough to implement most aspects of the model.

### 3.4.2 Model setup and validation

The model was setup and validated in collaboration with our industrial partner. Inputs values were based on data and information gathered from interviews, domain experts, confidential reports as well as data from various management systems and industry statistics. During the model setup, the only parameters to determine with respect to the behaviour of the procurement manager agent were the standard acceptance parameters  $\alpha$  and  $\rho$  and the risk level parameters  $\beta$  and  $\tau$ . These parameters were set in order to emulate accurately the actual buyer's behaviour. During this setup, we arbitrarily set these parameters values and simulated a standard production schedule. Then we compared the output inventory level with the actual values. Output results were analyzed with the prediction module of *Statistica* and the parameters were adjusted iteratively in order to obtain realistic inventory values. The best combination of parameters has an average difference of -4% with respect to actual numbers. This purchase behaviour was use for all experiments. Then, validation experiments were carried out to validate other performance indicators. To do so, we carried out 30 repetitions of simulation and compared the results with actual figures from year 2012 for most indicators, and between 2009 and 2012 for the inventory level and inventory variations. Along the same line, both options of using or not using the purchase control policy were simulated and used to validate the model.

### 3.4.3 Experimental Design and methodology

The main objective of this project is to propose cost efficient waste paper procurement and production policies for the industrial partner of this project. To do this, we studied procurement policies, which include 3 levels of inventory target (e.g. 10, 20 and 30 days of production) as well as the possibility to use or not flexible procurement contract. A flexible procurement contract is a supply contract with quantity flexibility (Lian and Deshmukh, 2009). In this simulation model, flexible contracts are implemented by adjusting the volumes of waste paper grades delivered daily to the planned production capacity. In other words, a flexible contract requires the supplier to deliver a volume of specific products according to the production plan requirements. Because the production plan may evolve over time according to the production flexibility policy used by the operation manager agent, the volume that is delivered by the contractual supplier agents may also evolve accordingly. Next, in order to evaluate the production policies, we introduce two other design factors related to Planned Capacity (PC) and Production Flexibility (PF), as defined in Table 3.1. Planned Capacity is defined as the average production capacity planned by the production manager agent. Production Flexibility is defined as the standard deviation of planned production monthly variations.

Table 3.1: Design of experiment

<b>Variable Parameter</b>	<b>Values</b>
<i>Planned capacity:</i> daily total planned production (tons)	L, N, H
<i>Production flexibility:</i> maximum daily production variability (tons)	L, N, H
<i>Target inventory</i> (days)	L, N, H
<i>Flexible Contract</i>	“with”, “without”

L: low; N: normal; H: high.

Unless specified otherwise, all these experiments were carried out with the purchase control policy. The resulting experimental design is a  $3^3 2^1$  full factorial design (3 factors at 3 modalities and 1 factor at 2 modalities). This complete plan was repeated 35 times for a total of 1890 simulation runs. Some parameters had a fixed value for the entire experiment (purchase control policy, forecast accuracy, recipe optimization, sorting accuracy, portion of purchase under contract, recipe robustness). These values were set within observed values. Finally, each

simulation run was made by simulating every production day between 2005 and 2012 (i.e. 7 years), using historical data as parameters. Warm up time is therefore negligible.

### 3.5 Results and Analysis

This section first presents the key performance indicators used to analyse the performance of the studied procurement and production policies. Next, the validation results are reported and analyzed. Finally, the results are presented and analyzed.

#### 3.5.1 Key performance indicators

In order to have a representative view of the performance of the various procurement policies, we developed in collaboration with the industrial partner several key performance indicators (i.e., KPI). Confidential management reports were also analyzed in order to identify the current indicators used to make decisions. Along the same line, interviews with domain experts were conducted to validate their relevance. These KPI are presented and defined in Annexe.

#### 3.5.2 Model validation

The first aspect validated was the market price model. To do this, the model output values were compared with historical market prices. In order to ensure the validity of this model, the internal factor of the market equation (i.e., volume of waste papers purchased by the recycler) was replaced by actual historical data concerning waste paper delivery, which is comparable to waste papers purchased over a long period (Figure 3.7). An average difference of 16% ( $R^2=0.78$ ) between both prices was recorded between 2001 and 2012, which is acceptable.

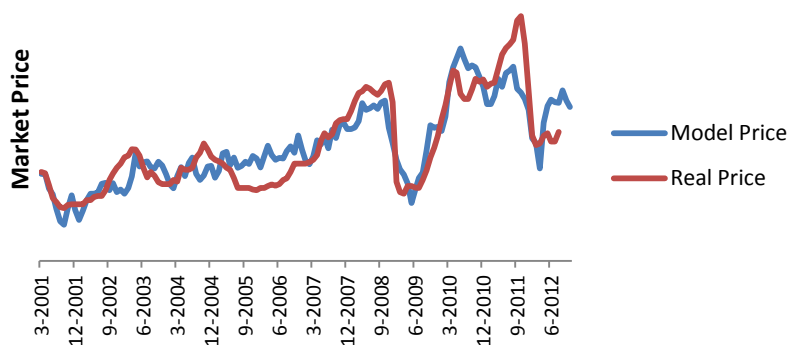


Figure 3.7: Market price validation over a 10-year period

Next, the validation of the entire model was carried out (Table 3.2). All variations were shown to domain experts and validated. More specifically, all indicators, but one are within a +/-6% range with actual data. However, inventory variations are smaller in the simulated results. This result can easily be explained by the systematic use of the purchase control policy that is only partially applied in practice. Therefore, we pushed further the validation of the model without the use of the purchase control policy. Table 3.3 shows that the purchase control policy has a major impact on inventory indicators. More specifically, the purchase control policy decreases inventory variation by almost 30%, and the average inventory level by 6%. Without purchase control policy, these figures increase by 6% and 5% respectively. Both options represent a lower and upper bound of the inventory performance observed in practice.

Table 3.2: Model validation results

<b>Key Performance Indicators</b>	<b>Lag with actual data</b>
Total cost	0 %
Purchase costs	-2%
Variable costs (excluding Waste papers)	4 %
Semi-Fixed costs	0 %
Fixed costs	-4%
Storage costs	-2 %
Inventory level	-6%
Inventory Variation	-28 %
Number of quality defaults	3 %

Table 3.3: Average gap to actual data of inventory level and inventory variations

	<b>Average Inventory Variation</b>	<b>Average Inventory level</b>	<b>Average Min</b>	<b>Average Max</b>
Without purchase control policy	6 %	5 %	22 %	5 %
With purchase control policy	-28%	-6 %	23 %	-9 %

As mentioned earlier, in the remainder of this analysis, all results involve simulations carried out with the purchase control policy. This choice was made because the model without purchase control policy has inconsistencies with respect to inventory level over a long period. More

specifically, if the procurement manager agent buys a large quantity of waste because of good market conditions, this situation can be carried over a long period depending on its magnitude. This affects artificially the results of the entire simulation run. The systematic use of the purchase control policy does not affect the validity of the model, although it represents a lower bound with respect to inventory indicators.

### 3.5.3 Results and analysis

The experiment first focused on the study of the impact of different purchase and production policies on cost, inventory and quality. Next, we studied the use of flexible contracts without the purchase control policy. This section presents and analyse the results.

#### 3.5.3.1 Costs

Total cost and its components are the main factors to study. Waste paper purchasing represents more 40% of total cost. Other cost components (see Annexe) are either fixed or semi-fixed. In practice, they represent between 15% and 25% of total cost. Similarly, warehouse cost usually represent between 0% and 15% of total cost. In the experiments, the factor with the biggest impact on total cost is production flexibility (t-value = 31.35), followed by target inventory (t-value = -21.43), and planned capacity (t-value = 13.80), However, Planned Capacity has the biggest impact on purchase cost alone (t-value = 110.28). Indeed, planned production capacity affects directly waste paper requirements, which in turn, influence positively market price.

Table 3.4: Cost impacts of Planned capacity

<b>Planned Capacity</b>	<b>Purchase Cost</b>	<b>Semi-fixed and Fixed costs</b>	<b>Total Cost</b>
Low	0 %	0 %	0 %
Normal	4 %	-8 %	0 %
High	8 %	-14 %	1 %

As shown in Table 3.4, reducing production capacity temporarily in order to match recycled pulp demand significantly decreases waste paper consumption, which in turn reduces the price paid per ton of waste paper. Therefore, it is better to adjust capacity utilisation to its minimum level, with respect to demand satisfaction, than systematically producing at maximum capacity and selling over produced inventory at no profit. This strategy allows the producer to save on fixed and semi-fixed costs. However, these savings are slightly smaller than the procurement cost

saving because this latter represents a significantly bigger proportion of the total cost. In addition, reducing the planned production capacity provides the procurement manager with leverage with respect to supplier selection, which is more difficult to quantify and model.

Concerning Target Inventory (TI), as shown in Figure 3.8, a high Target Inventory tends to decrease purchase cost (with a t-value of -63.65). This can be explained by the fact that the ratio (i.e., Equation 4), which is used to compute the portion of bulk buy on the spot market with respect to inventory, increases or decreases at a lower rate (for a given inventory variation) for a higher Target Inventory. In other word, a given inventory variation will lead to a larger ratio variation if the Target Inventory is small. Therefore, for an inventory variation below the Target Inventory, the portion of buy is higher if the Target Inventory is small. The practical consequence is that the procurement manager agent tends to react and buy more quickly with a lower Target Inventory, which is a rational behaviour to avoid waste paper shortage. The result of this behaviour with a high Target Inventory is that the procurement manager agent is allowed to have a larger inventory variation below the Target Inventory before it reacts and buy, whatever the market condition. Hence, the probability to purchase because of a good market forecast is higher, resulting in a small decrease of purchase cost.

This effect is even increased with a lower Production Flexibility. In other words, a lower Production Flexibility leads to a lower purchase cost (with a t-value of 29.91). This can similarly be explained because Production Flexibility directly affects the Target Inventory. Therefore, smaller variations of the Target Inventory reduce purchase cost by reducing the portion of bulk buy due to a lower inventory ratio. Along the same line (see Table 3.5), reducing the Target Inventory leads to a much lower warehouse cost for obvious reasons (i.e., less inventory to maintain). However, the effect of the Target Inventory on both purchase and warehouse costs illustrates the importance of purchase cost compared to warehouse cost. Similarly, results presented in Table 3.6 reveal that Production Flexibility has generally a negative impact on costs. This effect appears slightly more important when Target Inventory is higher, as shown in Figure 3.8.

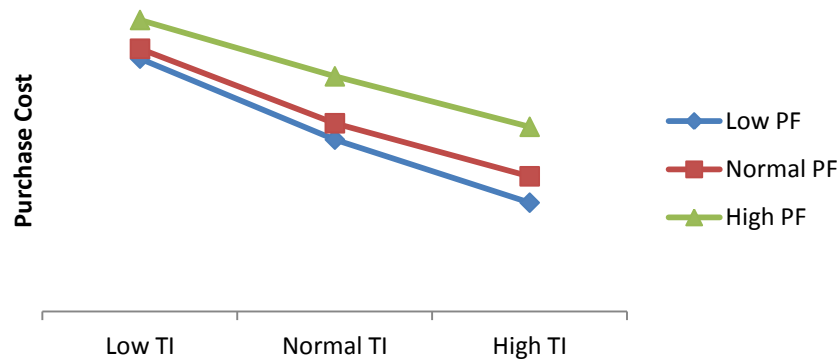


Figure 3.8: Combined effect of Target Inventory (TI) level and Production Flexibility (PF) on purchase cost

Table 3.5: Impact of Target Inventory of various cost components

Target Inventory	Purchase Cost	Warehouse Cost	Combined Costs
Low	0 %	0 %	0 %
Normal	-3 %	49 %	-1 %
High	-5 %	110 %	-2 %

Table 3.6: Impact of Production Flexibility of various cost components

Production Flexibility	Purchase Cost	Warehouse Cost	Combined Costs
Low	0 %	0 %	0 %
Normal	1 %	5 %	1 %
High	2 %	17 %	3 %

### 3.5.3.2 Inventory

As presented previously, two performance indicators related to inventory were specifically analyzed: average inventory level and average inventory variation (i.e., standard deviation of inventory level). As expected, the factor that has the most impact on inventory level is Target Inventory, as shown in Figure 3.9. The higher the Target Inventory is, the higher the inventory level. Similarly, Planned Capacity has a positive impact on inventory level, because, like Target Inventory, it directly affects the volume that is expected to be held.

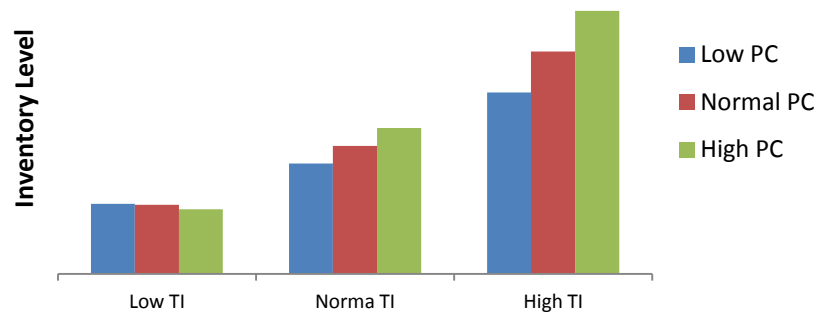


Figure 3.9: Combined effect of Target Inventory (TI) level and Planned Capacity (PC) on inventory level

Concerning inventory variation (Figure 3.10), it decreases when Target Inventory increases. When we carried out complementary experiments without the use of the purchase control policy, the effect was actually the opposite. This phenomenon is a consequence of the proposed behaviour of the procurement manager agent. As mentioned earlier, the practical consequence of its behaviour is that it tends to react and buy more quickly to avoid shortage with a lower Target Inventory (i.e., the portion of bulk buy is higher for a given volume below the Target Inventory, if this latter is lower). However, with a higher Target Inventory, the inventory cost becomes higher than the benefits of purchasing waste papers due to good market conditions. Therefore, the use of the purchase control policy tends to decrease inventory variation with a higher Target Inventory, because it prevents the procurement manager agent to purchase unnecessary waste paper in good market conditions.

However, this phenomenon is mitigated by Planned Capacity, which slightly increases inventory variation when it increases, as observed in Figure 3.10. Again, this can be explained by the behaviour of the procurement agent. As mentioned above, a lower Target Inventory leads to a higher portion of bulk buy for a given volume below the Target Inventory. Therefore, if the target inventory level is slightly higher because of a higher Planned capacity, then the agent requires a slightly larger volume below the Target Inventory in order to have a similar reaction. As mentioned before, this gives the agent more flexibility to purchase waste paper because of a good market condition, which in turn, leads to a slightly higher inventory variation.

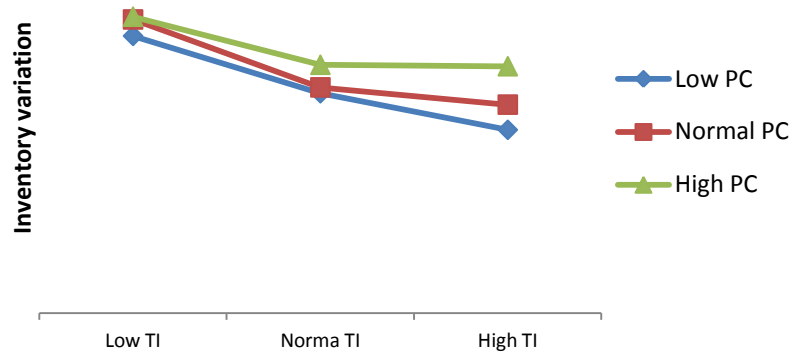


Figure 3.10: Combined effect of Target Inventory (TI) level and Planned Capacity (PC) on inventory variation

Concerning the impact of Production Flexibility (Figure 3.11), it positively affects, although slightly, both the average inventory level and the inventory variation. Production Flexibility is defined as the standard deviation of monthly variations of production level around the Planned Capacity. Therefore, a higher Production Flexibility involved higher increases or decreases in production level, which directly affects Target Inventory. Therefore, because the Target Inventory varies within a larger range for a higher Production Flexibility, the inventory variation also increases. Concerning the inventory level, in the case of an increase in production level, spot market waste paper procurement can meet increased production requirement. However, in the case of a decrease in production level, because the fixed volume supply contract is a lower bound constraint of the waste paper volume that is delivered daily, the inventory level tends to remain slightly higher. Therefore, overall, a higher Production Flexibility implies a slightly higher inventory level, as seen in Figure 3.11.

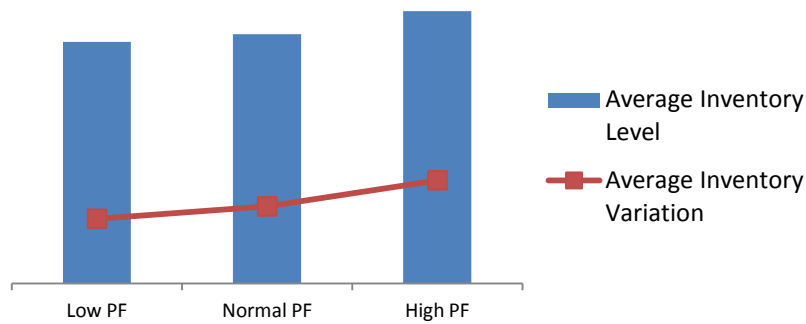


Figure 3.11: Impact of Production Flexibility on inventory performance

### 3.5.3.3 Quality

The two most significant factors that affect quality are Target Inventory and Planned Capacity. Because both factors affect positively the inventory level, they both improve the likelihood of having the right product in stock for any recipe to produce. Consequently, because the right mix of waste paper is available, the probability of having quality issues is lower, as seen in Figure 3.12. Most quality issues are linked to low inventory level, when there is not enough volume of the required grades, which forces the production manager to select a lower grade, thereby increasing the risk of producing a lower brightness.

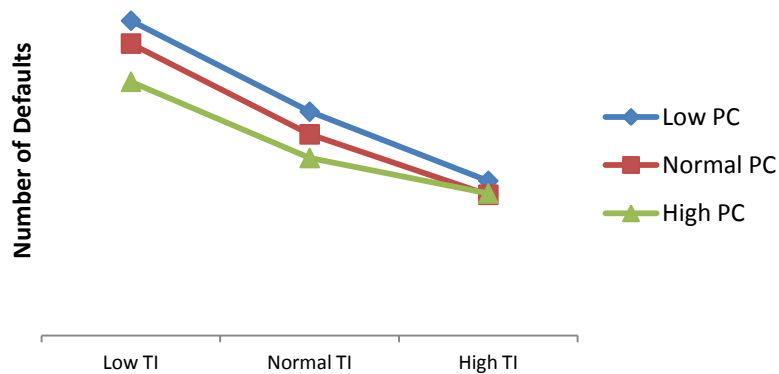


Figure 3.12: Combined effect of Target Inventory (TI) level and Planned Capacity (PC) on quality (number of defaults)

However, this specific effect of Planned Capacity on quality does not represent what the industrial partner observes in reality. It is therefore a limitation of the proposed model. Indeed,

our simulation model does not include the fact that a lower production level tends to improve quality control in general, and so, at every step of production including picking the right waste paper grade. Therefore, in practice, a lower Planned Capacity tends to improve quality.

As far as Production Flexibility is concerned, the higher it is, the higher the chance to run out of a specific grade of waste paper. Therefore, it also increases the chances to have quality issues, as seen in Figure 3.13.

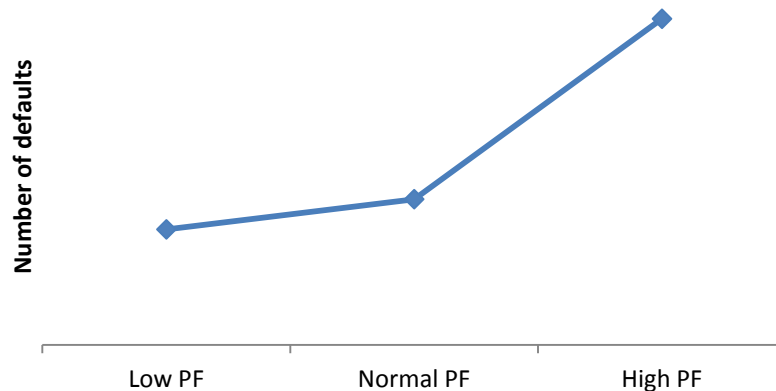


Figure 3.13: Effect of Production Flexibility (PF) on quality (number of defaults)

#### 3.5.3.4 Flexible contracts

Flexible supply contracts aim to cope with Production Flexibility by adjusting waste paper supply contracts according to the production level (and offset by the average delivery time). In order to specifically analyze the impacts of flexible contracts, we carried out experiments without the use of the purchase control policy, which has an impact of its own. Therefore, the same plan of experiment was replicated 40 times without the purchase control policy for a total of an additional 2160 simulation runs. Results are analyzed below.

First, flexible contracts have no observed impact on purchase cost, because contract prices are aligned with market prices. Furthermore, because waste paper supply volumes adapts automatically to production level, flexible contracts reduce the purchasing freedom of the procurement manager agent. Thus, in case of bad forecasted market conditions, the procurement manager agent cannot reduce deliveries, which, in turn, can increase total purchase costs. Concerning warehousing cost, however, flexible contracts have the expected effect, as they tend to reduce it as Production Flexibility increases, (see Figure 3.14). More specifically, warehouse

cost savings can be gained in the case of decreasing production level. In neutral market conditions, fixed contracts maintain artificially a higher than required level of inventory, while a flexible contract automatically decreases inventory level.

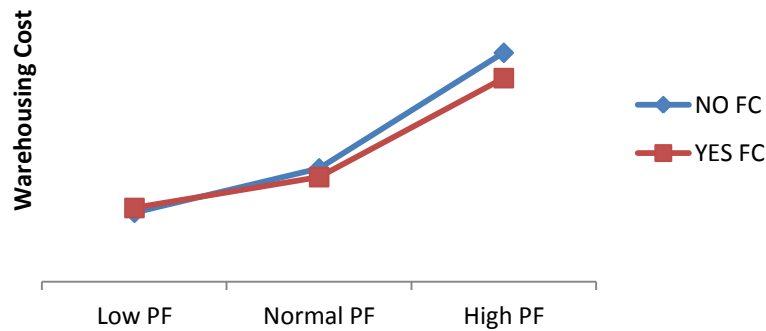


Figure 3.14: Combined effect of and Planned Capacity (PC) and Flexible Contract (FC) on Warehouse cost

The inventory indicators presented in Table 3.7 corroborates this result. These indicators are expressed as variations with respect to the average corresponding values obtained with no contract flexibility.

Table 3.7: Impacts of contract flexibility on inventory level and inventory variation with respect to no contract flexibility

	Average Inventory level			Average Inventory Variation		
	Low PF	Normal PF	High PF	Low PF	Normal PF	High PF
Contract Flexibility	1 %	-1 %	-4 %	2 %	-1 %	-5 %

First, flexible contract tends to reduce the inventory level as Production Flexibility increases, which is consistent with the explanation provided earlier. As far as inventory variation is concerned, flexible contracts have a similar effect. This can be explained because, with flexible contracts, a smaller portion of deliveries is actually controlled by the procurement manager agent, which can therefore make less discretionary purchase decisions.

Overall, although they do not seem to have an impact of purchase cost, flexible contracts tends to stabilize the recycler's inventory indicators, by reducing the negative impacts of Production Flexibility. This leads, in turn, to decreased warehouse cost.

Consequently, it is possible to conclude that a flexible contract policy is not advantageous when running at a steady production capacity. However, if production flexibility is necessary to meet varying demand, then flexible contract should be considered.

### **3.6 Discussion and Conclusion**

This paper proposed an agent-based simulation to study and optimize various procurement and manufacturing policies in the waste paper industry. To do so, instead of developing a theoretical model with many simplifying assumptions, a detailed simulation model based on a practical case was developed so as to emulate as accurately as possible production and procurement processes, as well as the procurement manager's behaviour. A set of experiments was carried out to validate the model and confirm that the simulation model reproduces accurately most performance indicators.

Next, different production and procurement policies were tested in order to analyze their performance. More specifically, factors including planned production level, production flexibility, target inventory as well as contract flexibility were studied.

The main conclusions of this study are that production flexibility has a negative impact on costs, inventory and quality, which is why in practice, pulp production plants usually try to operate at a steady production level. However, it is possible to partially reduce these issues with the introduction of flexible contracts, although only a limited effect has been observed in our experiments.

A more significant strategy to improve costs is to reduce production level to the minimum required to meet demand, without necessarily adjusting constantly planned capacity as with a high level of production flexibility. Along the same line, in practice, the reduction of production level has a positive impact of quality, which our simulation model fails to capture. This is an improvement to be made in future research.

Finally, a higher Target Inventory leads to a small cost improvement by giving the procurement manager more freedom to take advantage of good market conditions. However, this overall cost performance depends on the importance of warehousing costs and how the recycler calculates it. Our experiment did not try to challenge the partners' warehouse cost calculation.

As far as future work is concerned, these results represent a rather small part of all possible analysis. Factors including forecast accuracy, smart grade mixing, sorting process, percentage of purchase under contracts, suppliers' breakdown, and recipe robustness were fixed a priori and could be analyzed as well.

For example, sorting technology and recipe robustness could be studied in order to evaluate, and ultimately improve quality variability. Suppliers' breakdown, flexible contracts and fixed quantities under contracts could also be studied to further improve procurement.

Finally, the simulation model includes many processes from procurement to pulp production. However, only a few of all processes were actually modeled in an aggregated manner. Other processes, such as transport management, inventory management and handling, pulp sales, finished product warehousing and other raw materials procurement and storage, could be included in the model in order to be more accurate.

### 3.7 Acknowledgement

This project was supported by the NSERC, the FRQNT and an anonymous industrial partner. The authors would like to thank the industrial partner, as well as Amine Hajjoussef for his contribution to the simulation model development and implementation.

### 3.8 Annexe: Key performance indicators definition

The first KPI used is the Total cost. It is the sum of 5 types of costs, including Purchasing cost, Warehousing cost, Fixed and Semi-fixed cost, and Variable cost, as shown in Equation (11). Note that Warehousing cost is already defined in Equation (10).

$$Total\ cost = Purchasing + Warehousing + Fixed + Semi-fixed + Variable \quad (11)$$

$$Purchasing = \sum_{w \in W, s \in S, d \in D} (P_{wsd} + FC_s) * WP_{wsd} \quad (12)$$

$$Fixed = \sum_{d \in D} (E + L + T + O) \quad (13)$$

$$Semi-fixed = \sum_{d \in D} (MF + MV * FP_d) \quad (14)$$

$$Variable = \sum_{p \in P, d \in D} (CC_p + UC_p + SD_p) * FP_{pd} \quad (15)$$

with

$W$  is the set of all waste paper grades;

$S$  is the set of all suppliers plus the market;

$D$  is a set of simulated days;

$P$  is the set of finished products;

$P_{wsd}$  is the adjusted price of the grade  $w$  of supplier  $s$  for day  $d$ ;

$FC_s$  is the freight cost of supplier  $s$ ;

$WP_{wsd}$  is the quantity of grade  $w$  of supplier  $s$  purchased during day  $d$ ;

$E$  is the power expense required to run a recycle mill for one day;

$L$  is the leasing expense required to run a recycle mill for one day;

$T$  is the taxes expense required to run a recycle mill for one day;

$O$  is the other expenses required to run a recycle mill for one day;

$MF$  is the fixed management expense required to run a recycle mill for one day;

$MV$  is the variable management cost required to produce one ton;

$FP_d$  is the quantity of finished product produced during day  $d$ ;

$CC$  is the chemical cost required to produce one ton of product  $p$ ;

$UC$  is the utilities cost required to produce one ton of the product  $p$ ;

$SD_p$  is the Sludge Disposal cost required to produce one ton of the product  $p$ ;

$FP_{pd}$  is the quantity of product  $p$  produced during day  $d$ ;

The next KPI used is product Quality. It is calculated using Equation (16).

$$Quality = \sum_{d \in D} Default_d \quad (16)$$

With

$$Default_d = \begin{cases} 0 & \text{if the average brightness is lower than the minimum brightness} \\ 1 & \text{if the average brightness is higher than the minimum brightness} \end{cases}$$

We also used the Average inventory level as calculated in Equation (17).

$$AvgInv = \frac{\sum_{w \in W, d \in D} WP_{inv_{wd}}}{n} \quad (17)$$

W

ith

$WP_{inv_{wd}}$  is the inventory level of grade  $w$  for the day  $d$ ;

$n$  is the length (in days) of the simulation horizon;

Finally, we used the inventory variation, as presented in Equation (18).

$$InvVar = \sqrt{\frac{\sum_{d \in D} (\sum_{w \in W} WP_{inv_{wd}} - AvgInv)^2}{n}} \quad (19)$$

## CHAPITRE 4. DISCUSSION GÉNÉRALE

Ce mémoire propose une simulation à base d'agents afin d'étudier et d'optimiser les différentes politiques d'approvisionnement et de fabrication dans l'industrie des vieux papiers. Pour ce faire, la structure du modèle a été basée sur le cas pratique d'une usine de fabrication de papier recyclé et conçue précisément pour représenter ses processus et interactions.

### 4.1 Discussion sur la méthode

Une étape de validation a confirmé que la simulation reproduit avec précision les comportements les plus importants de l'entreprise. Donc la simulation à base d'agents a efficacement réussi à représenter les situations complexes que présentait le cadre pratique de ce projet. En voici quelques-unes. Premièrement, la SBA a permis la représentation des interactions entre les acteurs. Ces interactions, représentées par des comportements complexes, sont interconnectées, multiples et même coordonnées dans un système (la chaîne d'approvisionnement dans le cas pratique). Par exemple, les actions du centre de production sont en lien avec le plan de production qui oriente également les actions du gestionnaire des opérations et de l'entrepôt. La SBA permet de reproduire chacun de ces éléments séparément et d'établir aisément leurs règles de communication entre ceux-ci. Deuxièmement, le modèle de simulation développé contient plusieurs formes d'adaptation. Le gestionnaire des approvisionnements adapte ses achats selon le prix du marché et le niveau d'inventaire, qui dépend lui-même, en plus des achats, du centre de triage et du plan de production. Dans un autre exemple, le gestionnaire des opérations garde en mémoire les recettes antérieures utilisées pour la fabrication (rétroactions) afin de définir les prochains besoins de chaque grade. Troisièmement, la SBA a permis d'identifier des phénomènes émergents sur une longue période (2706 jours) dans un contexte dynamique et stochastique provoqué par différents plans de productions et différents contextes économiques.

### 4.2 Discussion pratique

Dans la phase d'expérience, quatre politiques opérationnelles et d'achat ont été expérimentés selon différents indicateurs de performance basés sur les coûts, l'inventaire et la qualité des produits finis. Plus précisément, les facteurs « cadence planifiée », « flexibilité de la production », « inventaire cible » et « contrats flexibles » ont été développés. L'objectif de cette

démarche était d'analyser et d'optimiser la stratégie d'approvisionnement d'une usine de fabrication de pâte recyclée tout en respectant sa stratégie de production.

La principale conclusion portant sur la flexibilité de la production semble indiquer que cette dernière a un impact négatif sur les coûts, l'inventaire et la qualité. Il est possible de réduire partiellement ces effets avec l'introduction d'une politique de contrats flexibles, mais son effet est limité. Une stratégie plus significative pour réduire les coûts peut être de réduire la cadence planifiée en gardant seulement les plus grosses commandes clients. Selon les résultats, cette stratégie peut également diminuer la qualité, mais il s'agit d'une imperfection du modèle. Celui-ci pourrait être adapté dans une prochaine étude pour qu'il inclue l'amélioration de la robustesse de la qualité lorsque la cadence ralentit. Enfin, un inventaire cible élevé permet de réduire les coûts d'achat, mais sa performance globale dépend des coûts d'entreposage. Pour l'usine partenaire étudiée, ceux-ci représentent une partie importante du coût total lorsque l'inventaire est élevé et éliminent presque tous les gains.

### **4.3 Leçons et apprentissages**

Le modèle s'est avéré très représentatif de la réalité, mais un long chemin a été parcouru pour y arriver. Bien qu'il soit générique dans sa forme, le modèle est spécifique comme beaucoup de modèles de simulation. La méthodologie requise pour obtenir aux résultats finaux est reproductible, mais aussi complexe à mettre en œuvre. D'abord, un modèle réaliste nécessite une très bonne compréhension des processus et une lourde collecte de données (comme le démontre le tableau en annexe 1). De surcroît, une fois trouvées, ces données doivent souvent être épurées, traitées et validées. Ensuite, il s'agit de les configurer dans le modèle ce qui nous ramène souvent à la première étape de compréhension des processus puisqu'une entreprise est un système trop complexe pour être traité du premier coup. Ainsi, réappliquer ce modèle à d'autres situations nécessite le réapprentissage complet des processus modelés et de ses acteurs.

Certaines difficultés doivent aussi être considérées lorsqu'on étudie des stratégies d'entreprise. D'abord, il est très difficile de discerner les incohérences de la simulation dans l'ensemble des possibilités que représente une entreprise. De plus, les conséquences des incohérences sont maintenues sur une longue période puisque les prochaines décisions dépendent des résultats précédents. Par exemple, si une décision illogique prise par un agent mène à un niveau d'inventaire anormalement haut, ce surplus peut demeurer dans le système pour des mois voir des

années et modifier les autres décisions au cours de cette période. D'ailleurs, c'est pourquoi nous avons fait des tests fonctionnels (comportement des agents) et des tests d'intégrations (tout le système ensemble). Dans un autre ordre d'idées, la validité des comportements est complexe puisque les données sont collectées sur une longue période. Elles datent souvent de différents moments ou bien représentent plusieurs tendances. Par exemple, l'analyse des achats était difficile puisque les données englobent des changements de comportements chez l'acheteur, une crise économique et des fusions/acquisitions de concurrents et de fournisseurs. Enfin, rares sont les stratégies qui sont systémiques en pratique. Plusieurs comportements sont occasionnels, mais influencent d'autres décisions et par conséquent la stratégie optimale. Le contrôle d'inventaire sporadique en est un bon exemple.

## **CONCLUSION, RECOMMANDATION ET TRAVAUX FUTURS**

Bien que les résultats soient positifs, de nombreuses nouvelles avenues s'ouvrent après ce projet. En effet, le modèle bâti pour ce mémoire se concentre sur un seul fabricant de pâte recyclée et sur son processus d'approvisionnement spécifique. Une addition très intéressante serait l'ajout des fournisseurs comme acteurs participatifs au modèle. En effet, les fabricants de pâte recyclée sont directement dépendants de ses fournisseurs et vice versa. Puisque la rareté du vieux papier compromet leur rentabilité, la prochaine étape pour plusieurs fabricants est la collaboration et peut-être même le partenariat afin de trouver des solutions qui diminueront cette variabilité à travers la chaîne d'approvisionnement. Il s'agit donc de modéliser les acteurs en amont et de trouver des opportunités de gain en efficacité telles que de nouveaux formats de contrat ou encore des ententes de pré-triage.

À un niveau plus pratique, les résultats obtenus lors de ce projet ne sont qu'une infime partie de l'ensemble des politiques potentielles pouvant être étudié. Plusieurs facteurs développés pour le modèle, mais ne faisant pas partie des expériences, pourraient être le sujet d'une nouvelle expérience. Par exemple, le choix de la technologie de triage et la robustesse des recettes de production permettraient d'analyser les variations de la qualité. La répartition des achats entre les fournisseurs, les contrats flexibles et la proportion d'achats fixés par des contrats pourraient être regroupés pour étudier la structure des approvisionnements. Ces facteurs ont été introduits dans la simulation, mais n'ont pas été testés, car notre objectif final était orienté sur les politiques opérationnelles et d'approvisionnement. Il n'en demeure pas moins que l'entreprise partenaire ainsi que d'autres compagnies similaires peuvent être intéressées aux autres ressources offertes par le modèle. Par ailleurs, la portée du modèle couvrait de nombreux processus en partant du premier contact avec les fournisseurs jusqu'à la production de pâte recyclée. Par manque de temps, seulement quelques-uns de ces processus sont entièrement représentés. D'autres procédés peuvent être insérés dans le modèle pour y ajouter plus de réalisme dont la négociation contractuelle et la négociation sur le marché courant, la gestion du transport, la gestion des stocks à un niveau plus bas, l'ajout de commande client, l'approvisionnement des autres matières premières, etc.

## BIBLIOGRAPHIE

- Allwood, J. and J. H. Lee (2005). "The design of an agent for modelling supply chain network dynamics." International Journal of Production Research **43**(22): 4875-4898.
- Atasoy, B., R. Güllü, et al. (2012). "Optimal inventory policies with non-stationary supply disruptions and advance supply information." Decision Support Systems **53**(2): 269-281.
- Axsäter, S. (2006). Inventory control, Springer Verlag.
- Axtell, R. L., C. J. Andrews, et al. (2001). "Agent-Based Modeling and Industrial Ecology." Journal of Industrial Ecology **5**(4): 10-13.
- Bahroun, Z., M. Moalla, et al. (2010). "Multi-agent modelling for replenishment policies simulation in supply chains." European Journal of Industrial Engineering **4**(4): 450-470.
- Barbati, M., G. Bruno, et al. (2012). "Applications of agent-based models for optimization problems: A literature review." Expert Systems with Applications **39**(5): 6020-6028.
- Bassok, Y. and R. Anupindi (1997). "Analysis of supply contracts with total minimum commitment." IIE transactions **29**(5): 373-381.
- Belecheanu, R. and M. Luck (2005). Agent-Based Factory Modelling: Eurobios and SCA Packaging A Case study, AgentLink III.
- Belecheanu, R. A., S. Munroe, et al. (2006). Commercial applications of agents: lessons, experiences and challenges. Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems. Hakodate, Japan, ACM: 1549-1555.
- Berglund, C. and P. Söderholm (2003). "An Econometric Analysis of Global Waste Paper Recovery and Utilization." Environmental and Resource Economics **26**(3): 429-456.
- Bollinger, L. A., C. Davis, et al. (2012). "Modeling Metal Flow Systems." Journal of Industrial Ecology **16**(2): 176-190.
- Cao, K., X. Feng, et al. (2009). "Applying agent-based modeling to the evolution of eco-industrial systems." Ecological Economics **68**(11): 2868-2876.
- Carr, W. F. and W. Appleton (1990). Recycling Paper: From Fiber to Finished Product.

Castellini, P., C. Cristalli, et al. (2011). Towards the integration of process and quality control using multi-agent technology. IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.

Charles, M. M. and J. Michael (2006). Tutorial on agent-based modeling and simulation part 2: how to model with agents.

Cheng, F., M. Ettl, et al. (2002). "Flexible Supply Contracts via Options."

Cid Yanez, F., J.-M. Frayret, et al. (2009). "Agent-based simulation and analysis of demand-driven production strategies in the timber industry." International Journal of Production Research **47**(22): 6295-6319.

Davidsson, P., J. A. Persson, et al. (2007). On the integration of agent-based and mathematical optimization techniques. Agent and multi-agent systems: technologies and applications, Springer: 1-10.

Deadman, D., R. K. Turner, et al. (1978). "Modelling the U.K. waste paper market." Resource Recovery and Conservation **3**(3): 237-247.

Dekker, R., J. Bloemhof, et al. (2012). "Operations Research for green logistics—An overview of aspects, issues, contributions and challenges." European Journal of Operational Research **219**(3): 671-679.

Ehrhardt, R. and L. Taube (1987). "An inventory model with random replenishment quantities." International Journal of Production Research **25**(12): 1795-1803.

Farnia, F., J.-M. Frayret, et al. (2013). "Multiple-round timber auction design and simulation." International Journal of Production Economics(0).

Forstall, F. (2002). "Industry and Trade Summary, Wood Pulp and Waste Paper." United States International Trade Commission, Washington.

Franklin, W. E., R. G. Hunt, et al. (1982). Waste Paper: The Future of a Resource 1980-2000, American Paper Institute.

Frayret, J.-M. (2011). "Multi-Agent System Applications In The Forest Products Industry." J-For-Journal Of Science & Technology For Forest Products And Processes **1**(2): 15-29.

- Frayret, J. M., S. D'amours, et al. (2007). "Agent-based supply-chain planning in the forest products industry." International Journal of Flexible Manufacturing Systems **19**(4): 358-391.
- Grossman Jr, T. A., T. R. Rohleder, et al. (2000). "A negotiation aid for fixed-quantity contracts with stochastic demand and production." International Journal of Production Economics **66**(1): 67-76.
- Inderfurth, K. and P. Kelle (2011). "Capacity reservation under spot market price uncertainty." International Journal of Production Economics **133**(1): 272-279.
- Jacobs, F. R., R. B. Chase, et al. (2009). Operations and supply management, McGraw-Hill.
- Jie, W. and L. Li (2008). Simulation for Constrained Optimization of Inventory System by Using Arena and OptQuest. Computer Science and Software Engineering, 2008 International Conference on, IEEE.
- Kaiser, M. J. and S. Tumma (2004). "Take-or-pay contract valuation under price and private uncertainty." Applied Mathematical Modelling **28**(7): 653-676.
- Kim, C. O., I. H. Kwon, et al. (2010). "Multi-agent based distributed inventory control model." Expert Systems with Applications **37**(7): 5186-5191.
- Lau, J. S. K., G. Q. Huang, et al. (2006). "Agent-based modeling of supply chains for distributed scheduling." Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on **36**(5): 847-861.
- Liang, W.-Y. and C.-C. Huang (2006). "Agent-based demand forecast in multi-echelon supply chain." Decision Support Systems **42**(1): 390-407.
- Lomi, A. and E. R. Larsen (1996). "Interacting locally and evolving globally: A computational approach to the dynamics of organizational populations." Academy of Management Journal: 1287-1321.
- Macal, C. M. and M. J. North (2010). "Tutorial on agent-based modelling and simulation." Journal of Simulation **4**(3): 151-162.
- McKinney, R. W. J. (1995). Technology of paper recycling, Springer.
- Moinzadeh, K. and S. Nahmias (2000). "Adjustment strategies for a fixed delivery contract." Operations Research: 408-423.

Moore, B. (2010). Changes in dynamics in recovered paper supply for tissue manufacturing. 5th International Conference and Exhibition for the North and South American Tissue Business, Tissue World Americas 2010, March 24, 2010 - March 26, 2010, Miami Beach, FL, United states.

Moss, S. and B. Edmonds (2005). "Sociology and Simulation: Statistical and Qualitative Cross-Validation1." American Journal of Sociology **110**(4): 1095-1131.

Moyaux, T., B. Chaib-draa, et al. (2007). "Information sharing as a coordination mechanism for reducing the bullwhip effect in a supply chain." Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on **37**(3): 396-409.

Parlar, M. and D. Perry (1996). "Inventory models of future supply uncertainty with single and multiple suppliers." Naval Research Logistics (NRL) **43**(2): 191-210.

Pěchouček, M. and V. Mařík (2008). "Industrial deployment of multi-agent technologies: review and selected case studies." Autonomous Agents and Multi-Agent Systems **17**(3): 397-431.

Pechoucek, M., M. Rehak, et al. (2007). "Agent-Based Approach to Mass-Oriented Production Planning: Case Study." Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on **37**(3): 386-395.

Posner, S. (1988). Low-tech Solutions to Solid Waste. Corrugated Containers Conference. TAPPI. New York, NY.

Rahman, M., A. Hussain, et al. (2009). Recyclable Waste Paper Sorting Using Template Matching Visual Informatics: Bridging Research and Practice. H. Badioze Zaman, P. Robinson, M. Petrouet al, Springer Berlin / Heidelberg. **5857**: 467-478.

Rahman, M. O., A. Hussain, et al. (2010). "Waste Paper Grade Identification System using Window Features." Journal of Computational Information Systems **6**(7): 2077-2091.

Riba Ruiz, J. R., P. Canals, et al. (2011). "Comparative Study of Multivariate Methods to Identify Paper Finishes Using Infrared Spectroscopy." Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on **PP**(99): 1-8.

Siebers, P. O., C. M. Macal, et al. (2010). "Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation!" Journal of Simulation **4**(3): 204-210.

Silver, E. A. (1976). "Establishing the order quantity when the amount received is uncertain." Infor **14**(1): 32-39.

Šišlák, D., M. Pěchouček, et al. (2008). AGENTFLY: Towards multi-agent technology in free flight air traffic control. Defence Industry Applications of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Springer: 73-96.

Stawicki, B. and B. Read (2010). The future of paper recycling in Europe: opportunities and limitations, Paper Industry Technical Association.

Uppin, M. and S. Hebbal (2010). "Multi Agent System Model of Supply Chain for Information Sharing." Contemporary Engineering Sciences **3**(1): 1-16.

Urban, T. L. (2000). "Supply contracts with periodic, stationary commitment." Production and Operations Management **9**(4): 400-413.

Valluri, A. and D. C. Croson (2005). "Agent learning in supplier selection models." Decision Support Systems **39**(2): 219-240.

Villanueva, A. and P. Eder (2011). "End-of-waste criteria for waste paper: Technical proposals."

You, X. and A. Kumar (2006). "An agent-based framework for collaborative negotiation in the global manufacturing supply chain network." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing **22**(3): 239-255.

## ANNEXE 1 – COMPOSANTES UTILISÉES DANS LE MODÈLE ET LES DÉMARCHES ENTREPRISES POUR LES DÉFINIR

<u>Agent</u>	<u>Attribut</u>	<u>Source</u>	<u>Explication de la source</u>
<b>Centre de fabrication</b>	1.1 Coût variable	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour l'année 2012	Divers coûts de fabrication ont été recueillis à partir de rapports comptables. Les connaissances du processus de fabrication proviennent de discussions avec les employés d'une usine de fabrication de pâte recyclée et de rapports quotidiens de production. Pour définir simplement le centre de fabrication et ses processus sans perdre trop de représentativité, seulement les indicateurs de performance généraux (le taux de rendement et robustesse du processus) ont été utilisés après avoir été recueillis dans les rapports de production.
	1.2 Coût semi-fixe	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour l'année 2012	
	1.3 Coût fixe	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour l'année 2012	
	1.4 Taux de rendement	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2009-2012	
	1.5 Robustesse (Quantité)	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2009-2012	
	1.6 Robustesse (Qualité)	Connaissance provenant d'un expert du domaine	
<b>Centre de triage</b>	2.1 Intensité de triage	Connaissance provenant d'un expert du domaine	Une première revue a été effectuée dans une usine de pâte recyclée pour recueillir des données statistiques au sujet des taux de déclassement et de rejet de vieux papier lors du triage. Ensuite, une étude des outils potentiels proposés dans la littérature et par certaines organisations d'experts (COST, TAPPI, outil PBS) a été effectuée afin d'identifier efficacement les gains que procurent le triage et ses différentes méthodes.
	2.2 Coût de triage	Connaissance provenant d'un expert du domaine	
	2.3 Amélioration des variations de qualité	Connaissance provenant d'un expert du domaine	
<b>Gestionnaire des opérations</b>	3.1 Politique d'inventaire	Connaissance provenant d'un expert du domaine	Une entrevue avec les responsables logistiques a permis de comprendre leurs comportements et les défis à surmonter. Leur comportement a été confirmé et quantifié en comparant les rapports personnels de ces gestionnaires avec des rapports historiques des stocks.
	3.2 Inventaire cible	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2009-2012	

<u>Agent</u>	<u>Attribut</u>	<u>Source</u>	<u>Explication de la source</u>
<b>Entrepôt</b>	4.1 Niveau d'inventaire	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2001-2012	Plusieurs coûts d'inventaire ont été calculés grâce à des rapports comptables. Sinon, des copies d'ententes contractuelles d'entrepôts fournies par une usine de pâte recyclée ont été utilisées. Ces contrats donnent aussi d'autres informations utiles comme l'espace disponible. Enfin, les données d'inventaire proviennent directement de données historiques extraites d'un système de gestion intégré utilisé par l'usine de pâte recyclée.
	4.2 Capacité maximale	Connaissance provenant d'un expert du domaine	
	4.3 Coût de transport et de manutention	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2011-2012	
	4.4 Coût d'opportunité	Connaissance provenant d'un expert du domaine	
	4.5 Coût de stockage	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2011-2012	
<b>Fournisseurs et marché</b>	5.1 Nom du fournisseur	Connaissance provenant d'un expert du domaine	La majorité de l'information provient d'un système de gestion intégré utilisé par une usine de pâte recyclée (section approvisionnement). Bien développé et dense en termes de données, la section d'approvisionnement a beaucoup d'indicateurs quotidiens sur les fournisseurs et leurs caractéristiques essentielles. Un expert en approvisionnement de vieux papier a également contribué à mettre en évidence les éléments plus importants.
	5.2 Qualité du service	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2005-2012	
	5.3 Qualité du produit	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2005-2012	
	5.5 Délais de livraison	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2005-2012	
	5.6 Capacité	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2005-2012	
	5.7 Coût de transport	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2005-2012	
	5.8 Index de prix	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2005-2012	
<b>Gestionnaire des approvisionnements</b>	6.1 Politique contractuelle	Connaissance provenant d'un expert du domaine	Une entrevue avec un expert en approvisionnement de vieux papier a permis de comprendre ses comportements et ses décisions importantes. Cette connaissance acquise a été confirmée et quantifiée en fonction d'indicateurs de performance telle que la quantité d'achats moyens, l'écart type et les max / min d'achats ainsi que les rapports personnels d'experts. Le but était de reproduire fidèlement son comportement dans les différents contextes possibles de marché et de production.
	6.2 Proportion des achats sous contrat	Connaissance provenant d'un expert du domaine	
	6.3 Indice d'aversion face au risque et indice d'achat standard (intensité d'achat)	Peaufinage manuel	
	6.4 Précision de prédiction	Inféré de données industrielles provenant d'un recycleur pour les années 2009-2012	