



**HAL**  
open science

# Modélisation et évaluation des vulnérabilités et des risques dans les chaînes logistiques.

Leila Sakli

► **To cite this version:**

Leila Sakli. Modélisation et évaluation des vulnérabilités et des risques dans les chaînes logistiques.. Informatique [cs]. Aix Marseille Université, 2016. Français. NNT: . tel-03527511

**HAL Id: tel-03527511**

**<https://hal.science/tel-03527511>**

Submitted on 15 Jan 2022

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

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

UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE

ECOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUES-INFORMATIQUE

UFR Sciences

LABORATOIRE DES SCIENCES DE L'INFORMATION ET DES SYSTEMES

UMR CNRS 7296

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur

Discipline : MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE

Spécialité : Informatique

Leïla SAKLI

Titre de la thèse : Modélisation et évaluation des  
vulnérabilités et des risques dans les chaînes logistiques.

Soutenue le 09/12/2016 devant le jury :

Caroline	THIERRY	Professeur à l'Université Toulouse 2	Rapporteur
Jacques	LAMOTHE	Professeur à l'Ecole des mines d'Albi	Rapporteur
Claudia	FRYDMAN	Professeur à l'Université d'Aix-Marseille	Examineur
Zied	JEMAI	Maître de Conférences à l'Université de Tunis El-Manar	Examineur
Jean-Claude	HENNET	Directeur de Recherche émérite au CNRS	Directeur de thèse
Jean-Marc	MERCANTINI	Maître de Conférences à l'Université d'Aix- Marseille	Co-directeur de thèse



# Résumé

Dans un contexte de recherche perpétuelle de nouveaux modèles de création de valeur, le développement des réseaux de communication, la spécialisation technique et la mondialisation des échanges ont contribué à la formation de chaînes logistiques. Les chaînes logistiques sont constituées d'entreprises en réseau dotées d'autonomie décisionnelle et organisationnelle. En dépit de leur caractère distribué, ces chaînes logistiques peuvent se révéler très performantes dans les conditions idéales de production et d'échange. Toutefois, leur complexité les rend de plus en plus fragiles. En particulier, elles sont sensibles aux perturbations locales d'ordre social, économique, financier, environnemental, qu'elles propagent souvent en les amplifiant. D'où l'intérêt porté aux domaines d'analyse et de gestion des risques du point de vue théorique et applicatif.

Cette thèse propose des modèles et des méthodes pour l'analyse des risques, de façon à renforcer la robustesse et la résilience du système.

Pour nous aider à mieux positionner nos travaux et à tirer les caractéristiques essentielles des chaînes logistiques, nous avons analysé ce domaine suivant une démarche ontologique à l'aide de la méthode KOD (Knowledge Oriented Design).

En nous appuyant sur un état de l'art du domaine des risques dans les chaînes logistiques, et sur les bases de cas réels, nous avons identifié les indicateurs des vulnérabilités les plus significatifs. Une fois caractérisées les vulnérabilités locales et globales, le risque peut être évalué par combinaison avec la probabilité de l'occurrence d'événements externes affectant par exemple fortement l'offre, la demande ou la production.

A partir des connaissances extraites, et des modèles mathématiques proposés dans la littérature, nous avons construit un modèle de chaîne logistique multi-étages à l'aide de modèles ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) intégrant l'aspect aléatoire de la demande. Pour adapter ce modèle aux situations de vulnérabilité et de risques, nous avons ajouté des contraintes de capacité et de positivité sur les commandes et sur les stocks.

Ce modèle a d'abord été utilisé en régime nominal non saturé, afin de caractériser le comportement du système soumis à des fluctuations aléatoires modérées. Sous ces types d'entrées, les maillons d'une chaîne logistique suivent eux aussi des modèles ARIMA.

Sous l'effet d'événements dangereux ou de fortes perturbations, certaines contraintes du système peuvent être atteintes et par conséquent, son évolution peut s'écarter fortement de la dynamique nominale, voire devenir instable. Nous avons proposé des indices pour signaler de telles situations, et pour définir des indicateurs de vulnérabilités comme des indicateurs de fréquence des retards de livraison, ou de surcoût d'immobilisation de produits.

Enfin, l'occurrence d'événements dangereux a été représentée par des scénarios. Nous avons alors obtenu des résultats de simulation sous MATLAB, qui nous ont permis d'évaluer leurs conséquences pour différentes configurations du système, en particulier sous perturbation des flux d'informations (demande) et des flux physique (qualité de produits approvisionnés).

Mots clés : ARIMA, Chaînes logistiques, KOD, Modélisation, Ontologie, Risques, Vulnérabilités.

# Abstract

In a context of a perpetual search of new value creation models, the development of communication networks, technical specialization and globalization of trade have contributed to the formation of supply chains. The supply chains consist of networking companies that have a decisional and organizational autonomy.

Despite their distributed nature, these supply chains can be very efficient in the ideal conditions of production and exchange. However, their complexity makes them more fragile. In particular, they are sensitive to local disturbances of social, economic, financial, environment, which are often propagated with amplification.

This dissertation proposes models and methods for risk analysis to enhance the robustness and resilience of the system.

To help us to better position our work and grasp the essential characteristics of supply chains, we analyzed this area following an ontological approach using the KOD method (Knowledge Oriented Design).

Based on state of the art in the field of risk in supply chains, and on real cases, we identified the indicators of the most significant vulnerabilities. Once characterized the local and global vulnerabilities, risk can be assessed by combining them with the probability of occurrence of external events strongly affecting supply, demand or production.

From the extracted knowledge and mathematical models proposed in the literature, we built the model of a multi-stage supply chain using ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) models incorporating the randomness of the demand. In order to adapt this model to situations of vulnerability and risk, we have added capacity and positivity constraints on orders and inventories.

First, we used this model in the unsaturated nominal regime, to characterize the behavior of the system under moderate random fluctuations. Under these types of inputs, the different stages of a supply chain also follow ARIMA models.

Under the impact of hazardous events or strong disturbances, some constraints of the system can be reached and therefore, its evolution may deviate considerably from the nominal dynamics or even become unstable. We proposed indices to report such situations and to define vulnerability indicators such as indicators of the frequency of

delivery delays or costs due to the immobilization of products.

Finally, scenarios were used to represent the occurrence of dangerous events. We then got simulation results in MATLAB, which allowed us to assess their consequences for different configurations of the system, especially for strong disturbances of information flows (demand) and physical flows (quality of the products supplied).

Keywords : ARIMA, Supply chains, KOD, Modeling, Ontologies, Risks, Vulnerabilities.



# Remerciements

Les travaux de recherches présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le cadre d'une thèse au sein du Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS), à Polytech Saint Jérôme.

J'exprime toute ma reconnaissance et mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, Monsieur Jean Claude Hennet, et mon co-directeur, Monsieur Jean Marc Mercantini, pour la confiance qu'ils m'ont témoignée et pour m'avoir guidé et suivi tout au long de ce travail. Je leur suis également reconnaissante pour leur proximité et leurs qualités humaines qui m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions.

J'exprime toute ma gratitude aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail de thèse : Madame Caroline Thierry et Monsieur Jaques Lamothe, Professeurs des Universités, en leur qualité de rapporteurs, Mme Claudia Frydman, Professeur des Universités, en sa qualité de président de jury, et Monsieur Zied Jemai, Maître des conférences, en sa qualité d'examineur.

Je tiens à remercier chaleureusement tous les membres du Laboratoire LSIS, en particulier, M. Aziz Naamane, M. Mohamed Quafafou, M. Lyess Benyoucef et M. Seifeddine Ben Elghali. Je n'oublie pas l'équipe de service informatique et les membres d'administration de LSIS. Leurs qualités humaines et leur sympathie, leur constante bonne humeur et leur encouragements ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail. Aux docteurs et doctorants de LSIS un grand merci pour les moments qu'on a passé ensemble, en particulier Radhia, Mouna, Fatma, Nawal, Aznam, Khaled, Dali et Moustapha.

Enfin, je rends hommage à ceux sans lesquels ce travail n'aurait pas pu être fait : à mes parents pour leurs sacrifices, à mon frère et mes sœurs pour leur soutien. Un remerciement très particulier et une reconnaissance infinie à mon mari Sahbi, ma fille Nour, et mes garçons Abdelhadi, Ayoub et Omar, à qui je dois beaucoup et sans qui ce travail n'aurait pas pu arriver à terme. Avec tout amour, je leur dédie ce travail.

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>Remerciements</b>	<b>8</b>
<b>Table des matières</b>	<b>9</b>
<b>Table des figures</b>	<b>13</b>
<b>Table des tableaux</b>	<b>17</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>2</b>
<b>PARTIE I : Etat de l'art et Conceptualisation des domaines des chaînes logistique et des risques</b>	<b>8</b>
<b>Chapitre 1. Analyse du domaine de la chaîne logistique</b>	<b>9</b>
1.1 Introduction	9
1.2 Présentation du domaine des chaînes Logistiques	10
1.2.1 Historique : de la logistique aux chaînes logistiques	10
1.2.2 Les maillons d'une chaîne logistique	11
1.2.3 Les flux d'une chaîne logistique	12
1.2.4 Les fonctions d'une chaîne logistique	13
1.2.5 La structure d'une chaîne logistique	15
1.2.6 Les différents types des chaînes logistiques	16
1.3 La gestion de la chaîne logistique	19
1.3.1 Le concept de la gestion de la chaîne logistique	19
1.3.2 Les niveaux décisionnels	20
1.3.3 La gestion des stocks	21
1.4 Modélisation et évaluation des performances	23
1.4.1 Les modèles conceptuels	23
1.4.2 Les modèles analytiques	25
1.4.3 Les modèles de simulation	25
1.4.4 Le modèle SCOR	26

1.4.5	Evaluation des performances	27
1.5	Analyse ontologique	29
1.5.1	Présentation d'une analyse ontologique	29
1.5.2	Le processus d'élaboration des ontologies	30
1.5.3	Analyse ontologique des chaînes logistiques	30
1.6	Conclusion	47
<b>Chapitre 2. Etude des risques dans les chaînes logistiques</b>		<b>49</b>
2.1	Introduction	49
2.2	Le concept de risque	50
2.2.1	La notion de risque	50
2.2.2	Définitions de risque	53
2.2.3	Le management du risque	55
2.2.4	L'analyse des risques	57
2.3	Etude des risques dans le domaine des chaînes logistiques	59
2.3.1	Définitions du risque dans les chaînes logistiques	59
2.3.2	Le management des risques dans les chaînes logistiques	61
2.3.3	Identification et classification des risques	62
2.3.4	Risque versus incertitude dans les chaînes logistiques	65
2.3.5	Vulnérabilité et résilience dans les chaînes logistiques	67
2.4	Modélisation des chaînes logistiques soumises à des risques	69
2.5	Conclusion et positionnement de la recherche	71
<b>Partie II : Modélisation d'une chaîne logistique confrontée à des risques</b>		<b>74</b>
<b>Introduction Partie II</b>		<b>75</b>
<b>Chapitre 3. Modélisation d'une chaîne logistique à partir des modèles ARIMA</b>		<b>76</b>
3.1	Introduction	76
3.2	Généralités sur les modèles ARMA	76
3.2.1	Séries chronologiques/temporelles	76
3.2.2	Les modèles ARIMA	77
3.2.3	Identification d'un modèle ARIMA	84
3.2.4	Prévision à l'aide d'ARIMA	86

3.3	Modélisation des chaînes logistiques par le modèle ARIMA	87
3.3.1	Représentation de la demande	90
3.3.2	Prévision de la demande	90
3.3.3	Représentation du niveau du stock	91
3.3.4	Représentation de la commande	92
3.3.5	Modélisation d'une chaîne logistique multi-étage	95
3.4	Etude des vulnérabilités des chaînes logistiques à partir des modèles ARMA	100
3.4.1	Présentation du problème l'effet Bullwhip	100
3.4.2	Simulation de l'effet Bullwhip	102
3.5	Conclusion	104
<b>Chapitre 4. Modélisation d'une chaîne logistique à l'aide des modèles ARIMA sous contraintes</b>		<b>106</b>
4.1	Introduction	106
4.2	Présentation de la chaîne avec ARIMA sous contraintes	107
4.2.1	Description du problème avec contraintes	107
4.2.2	Formulation mathématique	108
4.2.3	Modélisation des chaînes logistiques par le modèle ARIMA avec contraintes	108
4.2.4	Simulation d'une chaîne logistique à l'aide d'ARIMA sous contraintes	112
4.3	Définition des Indices et des indicateurs de vulnérabilités	117
4.3.1	Définition des Indices	117
4.3.2	Définition des indicateurs de vulnérabilité	118
4.3.3	Indicateur de rupture du stock	119
4.4	Application	122
4.5	Conclusion	125
<b>PARTIE III : Etude de vulnérabilité d'une chaîne logistique à l'aide de la simulation</b>		<b>128</b>
<b>Introduction Partie III</b>		<b>129</b>
<b>Chapitre 5. Etude de vulnérabilité d'une chaîne logistique face à une forte perturbation de la demande</b>		<b>130</b>
5.1	Introduction	130
5.2	Démarche d'analyse	131

5.3	Description du système	131
5.4	Définition des scénarios	132
5.5	Simulation du système	133
5.5.1	Simulation de la demande	134
5.5.2	Analyse et simulation des indices et des indicateurs	139
5.6	Conclusion	144
<b>Chapitre 6. Etude de vulnérabilité d'une chaîne logistique face à une forte perturbation de qualité des produits reçus</b>		<b>147</b>
6.1	Introduction	147
6.2	Présentation du problème de la non-qualité	147
6.3	Présentation du modèle ARIMA sous contraintes avec la prise en compte de l'indicateur qualité	149
6.3.1	Notation	149
6.4	Application	151
6.4.2	Analyse du système	152
6.4.3	Présentation des scénarios de perturbation	154
6.4.4	Etude de vulnérabilité de la chaîne logistique avec le 1 <sup>er</sup> scénario	157
6.4.5	Etude de vulnérabilité de la chaîne logistique avec le 2 <sup>ème</sup> scénario	162
6.5	Conclusion	166
<b>Conclusion Générale</b>		<b>169</b>
<b>Annexe 1</b>		<b>173</b>
1.	Présentation de la méthode d'analyse KOD	173
2.	Élaboration des modèles avec KOD	175
3.	Le cycle de vie de construction des ontologies avec KOD	176
<b>Bibliographie</b>		<b>178</b>

# Table des figures

Figure 1-1 : Différentes structures de la chaîne logistique (Mahmoudi, 2006).	16
Figure 1-2 : Les trois types des chaînes logistiques selon Mentzer et al. (2001).	17
Figure 1-3 : Classification des chaînes logistiques selon la forme organisationnelle.	18
Figure 1-4 : Chaîne logistique, (Hammami, 2003).	24
Figure 1-5 : Le modèle SCOR	26
Figure 1-6 : Actème Approvisionnement.	36
Figure 1-7 : Actème Transformation.	37
Figure 1-8 : Actème Distribution	37
Figure 1-9 : La chaîne logistique est une sorte de Réseau d'entreprises.	39
Figure 1-10 : Composants d'une chaîne logistique et composants d'entreprises (relation « Est composé de »).	40
Figure 1-11: Taxinomie installation (relation « Sorte de »).	40
Figure 1-12 : Composants d'une chaîne logistique selon le point de vue produit (relation « Est composé de »).	40
Figure 1-13 : Taxinomie des activités d'une chaîne logistique.	41
Figure 1-14 : Taxinomie du concept entreprise.	41
Figure 1-15 : Taxinomie de produit.	42
Figure 1-16 : les composantes d'une chaîne logistique selon le point de vue entreprise (relation « Est-composé-de »).	45
Figure 1-17 : Taxinomie des flux (relation « Sorte-de »).	46
Figure 1-18 : Taxinomie de produit (relation « Sorte-de »).	46
Figure 2-1 : Représentation schématique des différents courants de pensée (positiviste, constructiviste et hybride) d'après (Kermisch, 2011).	52
Figure 2-2 : Réseau sémantique impliquant les principaux concepts définis par la circulaire ministérielle n° DPPR/SEI2/MM-05-0316 (extrait).	54

Figure 2-3 : Modèle général du risque, (Gourc, 2006).	55
Figure 2-4 : Différentes étapes de gestion de risque.	56
Figure 2-5 : Les deux approches de l'analyse des risque.	57
Figure 2-6 : Évaluation du risque selon l'approche probabiliste.	58
Figure 2-7 : Évaluation du risques selon l'approche déterministe.	58
Figure 2-8 : Classification de risques dans la chaîne logistique.	65
Figure 2-9 : Classification des notions d'Ambiguïté, d'Ignorance, d'Incertitude et de Risque.	67
Figure 3-1 : Algorithme de Box et Jenkins pour Identifier un processus ARIMA	86
Figure 3-2 : Présentation modulaire d'une chaine logistique.	88
Figure 3-3 : Illustration des paramètres de calcul du stock dans le temps.	92
Figure 3-4 : Illustration des paramètres de calcul de la commande dans le temps.	93
Figure 3-5 : Modèle élémentaire d'une chaîne logistique.	95
Figure 3-6 : Dynamique de la demande ARIMA (0,1,1).	102
Figure 3-7 : Simulation des stocks relatifs aux étages 1 et 2.	103
Figure 3-8 : Simulation des commandes lancées par les étages 1 et 2.	103
Figure 4-1: Modèle mono-étage.	112
Figure 4-2 : Evolution de la demande réelle.	114
Figure 4-3 : Prédiction de la demande.	114
Figure 4-4 : Niveau du stock sans prise en compte des contraintes.	115
Figure 4-5 : Quantité des commandes sans la prise en compte des contraintes.	115
Figure 4-6 : Niveau du stock avec la prise en compte des contraintes.	116
Figure 4-7 : Quantité des commandes avec la prise en compte des contraintes.	116
Figure 4-8: Indice relatif aux stocks	122
Figure 4-9: Indice relatif aux commandes	123
Figure 4.4-10: Simulation d'indicateur d'excès de produits.	123
Figure 4-11: Simulation d'indicateur de pénurie du stock.	124
Figure 4-12 : Simulation de l'indicateur de retard.	124
Figure 4-13 : Simulation de l'indicateur de surcoût.	124
Figure 5-1 : Système de simulation avec une perturbation additive.	133

Figure 5-2 : Demande perturbée.	134
Figure 5-3 : Prédiction de la demande	135
Figure 5-4: Dynamique du stock sans la prise en compte des contraintes	136
Figure 5-5: Evolution de la quantité commandée, sans prise en compte des contraintes.	137
Figure 5-6 : Dynamique de niveau du stock avec la prise en compte des contraintes.	138
Figure 5-7 : Evolution des quantité commandées avec prise en compte des contraintes.	138
Figure 5-8 : Indice du stock $II_t$ .	139
Figure 5-9 : Indice de commande $OI(t)$ .	140
Figure 5-10 : Indicateur de rupture du stock $DelInd(t)$ .	141
Figure 5-11 : Indicateur de limite de fournisseur $SInd(t)$ .	142
Figure 5-12 : Indicateur de faible demande $LInd(t)$ .	142
Figure 5-13 : Indicateur de surcoût $ICostInd(t)$ .	143
Figure 5-14 : Indicateur de surcoût total $CostInd(t)$ .	144
Figure 6-1 : Système de simulation avec une perturbation multiplicative.	152
Figure 6-2 : Dynamique de la demande.	153
Figure 6-3 : Prévission de la demande.	154
Figure 6-4: Evolution de l'indicateur de qualité selon le premier scénario.	156
Figure 6-5 : Evolution de l'indicateur de qualité selon le deuxième scénario.	157
Figure 6-6 : Niveau du stock, scénario1.	158
Figure 6-7 : Evolution des commandes, scénario1.	158
Figure 6-8 : Indices du stock, scénario 1.	159
Figure 6-9 : Indicateur de retard de scénario 1, sans prise en compte de l'indicateur Z.	159
Figure 6-10 : Prédiction de l'indicateur qualité de scénario 1.	160
Figure 6-11: Evolution du stock avec le prédicteur de qualité , scénario 1.	160
Figure 6-12: Evolution des commandes (scénario 1), avec prise en compte de la perturbation de qualité.	161
Figure 6-13: Indicateur de retard (scénario 1), avec la considération de la	

perturbation de qualité.	161
Figure 6-14: Indicateur de limite d'approvisionnement (scénario 1), avec prise en compte de perturbation qualité.	162
Figure 6-15: Evolution du stock sous contraintes (scénario 2), sans le prédicteur de qualité.	163
Figure 6-16 : Evolution des commandes sous contraintes (scénario 2), sans le prédicteur de qualité.	163
Figure 6-17 : Prédiction de l'indicateur qualité (scénario 2).	164
Figure 6-18: Dynamique du stock (scénario 2) avec le prédicteur de qualité.	164
Figure 6-19: Dynamique de commandes (scénario 2) avec le prédicteur de qualité.	165
Figure 6-20 : Indicateur de retard (scénario 2) avec le prédicteur de qualité.	166
Figure 6-21 : Indicateur de coût (scénario 2) avec le prédicteur de qualité.	166
Figure Annexe1-1 : Le processus de conception d'outils logiciels d'aide à la résolution de problèmes et à la prise de décision suivant la méthode KOD.	176

# Table des tableaux

Tableau 1 : Politiques classiques de gestion des stock.	22
Tableau 2 : Attributs de performance proposés par le modèle SCOR.	28
Tableau 3 : Corpus des définitions des chaînes logistiques.	32
Tableau 4 : Définitions du risque dans les chaînes logistiques.	60
Tableau 5 : Classifications des risques des chaînes logistiques.	64
Tableau 6 : Tableau des notations.	95
Tableau 7 : Correspondance entre modèle de domaine et variables du modèle de la chaîne logistique présenté par ARIMA.	99
Tableau 8 : Table des notations du modèle sous contraintes	109
Tableau 9 : Table complémentaire de notations : les indices.	117
Tableau 10 : Définition des indicateurs de vulnérabilité.	119
Tableau 11 : Table complémentaire de notations : les indicateurs.	119
Tableau 12 : Différentes demandes simulée	125
Tableau 13 : Résultats des simulations.	125
Tableau 14 : Plan de simulation de la demande perturbée	133
Tableau 15 : Paramètres de la simulation.	136
Tableau 16 : Table des notations de problème de non-qualité ;	150
Tableau 17 : Modèles des scénarios de perturbations des flux.	156
Tableau 18 : Les trois niveaux de modélisation de KOD.	174

Tableau 19 Intégration de la méthode KOD au sein du processus d'élaboration des ontologies.

177



# Introduction Générale

L'évolution des réseaux et des moyens du transport et l'avènement des technologies d'information et de communication illustrent l'augmentation de la circulation des biens et de services. Ce développement considérable des technologies de communication a participé à la modification de la nature des entreprises et des modes de production et a contribué à la formation des chaînes logistiques constituées d'entreprises en réseau, dotées d'autonomie décisionnelle et organisationnelles afin de répondre au mieux aux exigences du marché actuel caractérisé par la réduction de cycles de vie des produits, par la volatilité de la demande, etc. La mondialisation des échanges, la réduction de cycles de vie des produits, l'orientation client, sont des questions qui influent considérablement sur les entreprises d'aujourd'hui afin d'améliorer leur productivité et la performance des fonctions qu'elles accomplissent. Dans un environnement concurrentiel mondialisé en stagnation économique, où les entreprises sont à la recherche de nouveaux modèles de création de valeur, la question est de savoir quels modèles stratégiques, tactiques et opérationnels à déployer pour passer de la nécessité affirmée à la mise en œuvre de nouvelles approches relationnelles créatrices de richesses.

Des nouvelles stratégies de gestion telles que les tendances à l'externalisation, la délocalisation vers des pays à bas coûts, la sous-traitance, les productions allégées (Lean SC), la gestion du stock en flux tendu ainsi que des nouveaux concepts de Juste à Temps, de Zéro Stocks, etc., sont adoptés. Malgré leur caractère distribué, les chaînes logistiques peuvent se révéler très performantes dans les conditions idéales de production et d'échange (Jüttner et al. 2003 ; Mason-Jones et Towill, 1998 ; Wagner et Neshat 2010). Néanmoins, la complexité des chaînes logistiques les rend de plus en plus fragiles et crée des nouvelles vulnérabilités (Michel-Kerjan, 2002). Ainsi, l'évolution rapide au niveau des flux des marchandises a été accompagnée d'un accroissement des risques et des menaces d'origines diverses.

Plusieurs événements remarquables ont gravement touché les chaînes logistiques ces dernières années. Des exemples de risques causés par différents événements ne manquent pas dans la littérature, dont les origines sont des catastrophes naturelles (le Tsunami de l'Océan Indien en 2004, l'ouragan de Katrina en 2005, le volcan Eyjafjöll en 2010), les attaques terroristes (attentat du 11/9/2001, attentats de Madrid en 2004, détournement de conteneurs dans l'océan), l'instabilité politique, etc.

Nous commençons par présenter quelques exemples d'événements naturels en particulier la triple catastrophe de Fukushima du 11 mars 2011 (un séisme de magnitude

9, suivi d'un tsunami qui a causé une catastrophe nucléaire jugée aussi grave que celle de Tchernobyl en 1986), qui outre le lourd bilan humain et les destructions subies, a causé des dommages qui ont affecté de nombreuses entreprises implantées au Nord Est du Japon. Ceci a handicapé les constructeurs pendant plusieurs semaines à cause du ralentissement de l'acheminement des composants et des produits, des coupures de courant, des difficultés d'approvisionnement en carburant, ce qui a perturbé la production. Les ruptures et perturbations locales se sont rapidement étendues mondialement notamment elles ont été ressenties en Asie et aux Etats-Unis, dans les industries électroniques, l'imagerie et l'automobile, vue la place, et dans certains cas le monopôle, du Japon dans les secteurs de haute technologie. Par exemple, ce tremblement de terre a perturbé les productions automobiles planifiées pour un maximum de trois mois et a retardé l'introduction du produit iPad2 d'Apple dans le marché. En effet, le commerce extérieur du Japon a été touché et les ruptures du stock ont fortement impacté les exportations japonaise qui ont chuté de 10,3% au mois de mai 2011, comparé au mois de mai 2010. Ajoutons à cela la chute du taux de change du Yen, qui selon l'institut de recherche du Japon (JRI), a provoqué une chute des profits des entreprises du secteur «équipements» (automobile, machines outil, etc.) de 490 milliards de Yen sur la seconde moitié de l'année fiscale 2011 (Japan Research Institute, 2012).

Un deuxième exemple d'événements perturbateurs est relatif à l'augmentation de la piraterie mondiale. Après les attaques de 11 septembre 2001 qui ont touché les Etats Unis, les procédures de sécurité ont été augmentées entre les USA et le Canada, ce qui a ralenti la fréquence d'échange due à inspection accrue de sécurité des véhicules. Ce ralentissement a conduit à la fermeture intermittente d'un nombre important d'usines de montage d'automobiles. Pendant cette période, 47 123 unités parmi les 346 034 unités de produits prévues en Amérique du Nord ont été annulées, avec un manque à gagner de 13,6% de la production (Bradley, 2014). A l'Ambassador Bridge de Detroit, premier point de passage commercial terrestre, situé à la frontière entre les Etats unis et le Canada, qu'empruntent chaque jour plus de 5000 camions, le temps d'attente, suite à la mise en place de contrôles douaniers minutieux qu'imposaient des règles de sécurité renforcées, pouvait atteindre les 12 heures. « Les files de camions s'étendaient parfois sur près de 20 miles (32 Km) ». Les retards conséquents ont eu pour effet majeur de paralyser l'activité de production des entreprises qui s'approvisionnent de l'étranger. Les premiers touchés étaient les constructeurs automobiles, la plupart ayant fortement réduit leurs stocks de pièces détachées et de composants. Cet exemple a incité les chercheurs à se focaliser sur le sujet du risque dans les chaînes logistique. Sheffi (2001) est parmi les premiers auteurs qui ont proposé des réponses aux dégâts causés par le terrorisme avec un article mettant l'accent sur la nécessité d'instaurer les méthodes de gestion de la chaîne logistique internationale. Il a aussi recommandé d'améliorer de la visibilité sur les envois et la collaboration.

Le troisième type d'évènement que nous allons présenter concerne les incendies. La séquence des incendies au niveau de sous-traitants en traitement de surface (Prodec-Métal à Canéjan en juin 2011, Casablanca Aéronautique- groupe Slicom en avril 2011) a affaibli l'industrie aéronautique et aggravé la saturation des capacités et les retards des livraisons. Un incendie peut se déclencher en raison d'actions humaines comme dans le cas des émeutes d'Angleterre en 2011, qui ont causé l'incendie du stock du centre de distribution de Sony (CADC) en Angleterre, avec une perte comprise entre 3,5 et 25 millions d'unités. D'autres incendies se sont déclenchés d'une façon naturelle, tel que l'incendie de l'usine Philips à Albuquerque, New Mexico, qui été frappée en 2000 par une foudre en laissant ses clients, Ericsson et Nokia, sans fournisseur à cause de l'interruption de la production pendant 6 semaines, ou aussi dû à un problème interne à l'installation, comme le cas de l'entrepôt de pièces détachées de Renault à Grand-Couronne qui a pris le feu à cause d'une fuite de gaz en Août 2010 (Bradley, 2014).

Le dernier exemple montre que la source de l'évènement peut être aussi interne à la chaîne logistique. Il existe d'autres évènements internes tels que les grèves (une grève de 3 semaines chez Harley Davidson a interrompu la production à sa plus grande usine à York, en Pennsylvanie) ou bien le conflit entre Ford et Nestar en 2007 qui a interrompu la production de camions Ford et a réduit les planifications sur une période de 14 jours (Bradley, 2014).

Ces différents exemples montrent que les évènements se traduisent par des perturbations internes aux chaînes logistiques en perturbant le flux de matières, le flux d'information, ou encore le flux financier, qui à leur tour peuvent soit diminuer les ventes, soit augmenter les coûts, soit les deux à la fois. Ceci engendre des retards ou éventuellement des interruptions des chaînes.

Les chaînes logistiques sont particulièrement sensibles aux perturbations locales, par exemple de la demande ou des approvisionnements, qu'elles propagent souvent en les amplifiant (selon l'effet bullwhip) et entraînent des conséquences à grande échelle. Ainsi, les répercussions ne sont pas ressenties uniquement au niveau de l'entreprise où a lieu l'évènement initial, mais peuvent toucher la structure des chaînes entières, indépendamment de la localisation géographique des entreprises qui les composent. La robustesse des réseaux logistiques est donc essentielle à la fois pour les organisations individuelles et pour la chaîne dans son ensemble. C'est pourquoi les domaines de l'analyse et de la gestion des risques dans les chaînes logistiques suscitent actuellement un grand intérêt, aussi bien du point de vue théorique qu'applicatif.

L'objectif principal de ce mémoire de thèse est de proposer des modèles et des méthodes pour l'analyse et la gestion des risques, de façon à renforcer la robustesse et la résilience du système. Nous définissons des modèles et des indicateurs permettant

d'étudier le comportement d'une chaîne logistique à l'occurrence des évènements indésirables. A cette fin, ce mémoire est structuré en trois parties.

L'étude des vulnérabilités et des risques dans les chaînes logistiques nous conduit, au préalable, à préciser les termes centraux de notre travail de recherche qui s'articule autour des concepts *de chaîne logistique* et de *risque*. **La première partie** est scindée en deux chapitres. le *premier chapitre* est dédié à la présentation et à l'analyse ontologique du domaine des chaînes logistiques, dans le but de mettre en évidence ses caractéristiques essentielles. En préalable à l'analyse ontologique, nous présentons les outils méthodologiques mis en œuvre. En particulier, nous présentons la méthode Knowledge Oriented Design (KOD), issue de l'Ingénierie des Connaissances, qui a pour objet de guider son utilisateur dans les processus d'acquisition et de modélisation des connaissances. À l'issue de ce premier chapitre, un modèle conceptuel du domaine des chaînes logistiques sera proposé.

Le *deuxième chapitre* est consacré à la présentation et à l'analyse du concept de risque ainsi qu'à une réflexion concernant la prise en compte des risques dans les chaînes logistiques. Au terme de cette réflexion, nous proposerons des modèles de scénarii de simulation propres à évaluer les chaînes logistiques en terme de performance vis à vis des risques. En conclusion du chapitre, nous formulerons notre positionnement de recherche.

A partir des connaissances extraites et des modèles mathématiques proposés dans la littérature, on cherchera, dans **la deuxième partie**, à construire un modèle de chaîne logistique multi-étages, qui permette l'évaluation de ses performances en régime de fonctionnement nominal ainsi qu'en fonctionnement dégradé, où le modèle doit permettre aussi la construction d'indicateurs de vulnérabilité.

Dans le *Chapitre 3*, nous présentons un modèle qui sera d'abord utilisé en régime nominal (linéaire) pour caractériser le comportement d'une chaîne logistique soumise à des fluctuations aléatoires de la demande, représentée par des modèles ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average). Il a été montré que sous ces types d'entrées, les maillons d'une chaîne logistique suivent eux aussi des modèles ARIMA. Nous étudions par simulation l'effet des fluctuations de la demande qui se transmettent au système à travers des variations des niveaux de production et du stockage, connu sous le nom de l'effet coup de fouet (« Bullwhip effect »).

Cependant, le comportement linéaire du système n'est vérifié qu'à l'intérieur du domaine des contraintes sur les niveaux de production et sur le stockage. Dans le *quatrième chapitre*, nous étudierons l'introduction de contraintes de seuil sur les variables de production et de stockage. Nous obtiendrons un modèle d'une chaîne logistique à l'aide d'ARIMA sous contraintes. Nous allons voir que sous l'effet

d'événements dangereux ou de fortes perturbations, certaines contraintes du système peuvent être atteintes et l'évolution du système peut s'écarter fortement de la dynamique nominale et même devenir instable. Les objectifs de ce chapitre seront d'une part de simuler le comportement dégradé du système, d'autre part de construire des indicateurs de vulnérabilité comme des indicateurs de fréquence des retards de livraison, et de surcoûts d'immobilisation de produits.

Tout au long de la **troisième partie**, nous nous intéressons à analyser et évaluer le risque d'une chaîne logistique. L'occurrence d'événements dangereux pourra être représentée par des scénarios, et leurs conséquences seront évaluées à l'aide de la simulation et à travers les indicateurs proposés.

Indépendamment des sources des événements indésirables, nous nous intéressons dans le *Chapitre 5* à simuler le système sous fortes perturbations de la demande. Les fortes perturbations seront introduites dans le modèle sous une forme additive.

Dans le *Chapitre 6*, nous présenterons une extension de notre modèle pour prendre en compte des perturbations sur l'approvisionnement. Ces variations seront introduites dans le modèle sous forme d'une perturbation multiplicative. Nous allons simuler le système sous fortes perturbations de la qualité de produits approvisionnés et nous allons également proposer un modèle permettant de s'adapter à ce phénomène dangereux.

En guise d'une *conclusion générale*, présentons un bilan final de ce travail de recherche et nous ouvrons à la fin quelques perspectives de recherches.



# **PARTIE I : Etat de l'art et Conceptualisation des domaines des chaînes logistique et des risques**

# Chapitre 1. Analyse du domaine de la chaîne logistique

## 1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre nous nous focalisons sur le concept *chaîne logistique*. Nous commençons par présenter un état de l'art sur ce domaine, dont le but est de construire une conceptualisation de ce domaine permettant de mieux préciser les problèmes qui peuvent émerger.

Tout d'abord, nous exposons, dans la section 1.2, le cadre historique de l'apparition de ce concept. Ensuite, nous enchaînons avec la présentations des éléments qui le composent, les fonctions qu'elles assurent, ses différentes structures ainsi que les différents types des chaînes logistiques qui existent .

Ensuite, et dans la section 1.3, nous présentons le concept de gestion de la chaîne, et dans la section 1.4, nous nous intéressons à la modélisation et l'évaluation des performances des chaînes logistique.

La revue de littérature sur les chaînes logistiques a mis en évidence un domaine de connaissances récent, en pleine évolution et dont les définitions des concepts sont nombreuses, paraissent similaires (Hammami, 2003), mais semblent ne pas être encore complètement stabilisées.

Pour nous aider à mieux positionner nos travaux et, par conséquent, notre apport dans le domaine des chaînes logistiques, nous avons pris le parti, dans la section 1.6, d'analyser ce domaine suivant une démarche ontologique, sans toutefois prétendre à en proposer une ontologie. Nous commencerons la section 1.6 par une présentation de l'outil KOD utilisé durant cette analyse, et pour expliquer son déroulement, nous appliquerons cette méthodes sur quelques exemples de définitions des chaînes logistiques.

## 1.2 Présentation du domaine des chaînes Logistiques

### 1.2.1 Historique : de la logistique aux chaînes logistiques

Le concept de chaîne logistique a été, et continu à être largement étudié par la communauté scientifique issues de différentes disciplines (les sciences de gestion, le génie industriel, l'informatique, l'automatique, etc.). Le concept lui-même n'est pas nouveau et illustre le passage de l'intégration de la fonction logistique d'une entreprise à un ensemble d'entreprises grâce au développement technologique en général et l'évolution des technologies d'informations en particulier.

Le terme logistique est d'origine grec, il provient du mot « *logistikos* » qui désigne l'art du raisonnement et du calcul. Il été initialement utilisé dans le domaine militaire, pour définir l'ensemble des opérations qui permettent aux armées de vivre et, de mettre en œuvre et réussir les stratégies et tactiques relatives aux combats (ravitaillement, transports, entretien, évacuation, traitement médical, etc.).

La logistique a été introduite dans le milieu industriel au début du siècle dernier (les années 40). Au début, elle concernait principalement la manutention et le transport des marchandises. C'est au cours des années 70, que la logistique commence à avoir plus d'importance dans la gestion des entreprises, dans un but d'optimiser la gestion des commandes (quantité, périodicité, niveau du stock de sécurité, etc.), des plans de production et des systèmes de distribution.

Entre les années 80 et 90, la mission de la logistique s'élargit à la coordination des différentes fonctions participant à la circulation des flux au sein d'une entreprise. Elle se définit « comme une démarche de pilotage et de gestion des flux physiques de marchandises par des flux virtuels d'informations associées » (Colin, 2005).

A partir des années 90, on assiste à l'émergence des partenariats inter-entreprises, la logistique dépasse désormais les frontières de l'entreprise en recherchant le pilotage d'une forme particulière de réseaux d'entreprises appelée « chaîne logistique ». La chaîne logistique représente une structuration de plusieurs entreprises à la recherche permanente d'orientations stratégiques afin de rester compétitives. C'est un « système grâce auquel les entreprises amènent leurs produits et leurs services jusqu'à leurs clients » (Poirier et Reiter, 2001). D'autres définitions des chaînes logistiques ont été proposées. Nous les avons regroupées dans le Tableau 3, paragraphe (§1.5.3.2).

Les différentes entreprises qui participent à une chaîne logistique représentent les maillons<sup>1</sup> de la chaîne, et ces maillons sont liés par des flux. Différents types de chaînes logistiques peuvent être définies suivant leurs structures (liées aux flux) et l'organisation des maillons.

## **1.2.2 Les maillons d'une chaîne logistique**

Les maillons d'une chaîne logistique sont les entreprises qui vont assurer la réalisation d'un produit donné dans le but d'assurer la compétitivité de la chaîne logistique dans un marché concurrentiel.

Merzouk propose une classification des différentes entités selon le point de vue fonctionnel (Merzouk, 2007). Les entreprises sont distinguées selon leur rôle joué pour assurer la transformation des produits. Tayur et al. (1999) listent les différents composants d'une chaîne, en particulier les différentes catégories d'entreprises impliquées (sous-traitants, producteurs, distributeurs, détaillants). Ils considèrent aussi que le client final fait partie de la chaîne logistique.

Merzouk (2007) propose également une deuxième classification de ces entités selon le point de vue organisationnel. Pour une entreprise donnée, cette classification consiste à identifier chaque maillon de la chaîne selon sa relation avec cette entreprise. Il distingue trois maillons essentielles :

- L'ensemble des maillons situés en amont de l'entreprise qui prennent en charge d'alimenter un système d'exploitation (ligne de fabrication ou entrepôt) par des matières premières. Il s'agit des fournisseurs.
- L'entreprise en question qui se charge de la production.
- L'ensemble des maillons qui interviennent en aval de l'entreprise. Il s'agit des distributeurs qui transportent les produits vers les clients.

En ce qui concerne le nombre de maillons, Stadler et al. (2000) indiquent qu'une chaîne logistique est composée d'au moins deux entreprises.

Les maillons sont hétérogènes et peuvent être éparpillées partout dans le Monde

---

<sup>1</sup> Le terme maillon est ici utilisé par rapport à la notion de la chaîne dans l'expression « chaîne logistique » (Hammami, 2003). On trouve également d'autres termes tels que acteurs, étages, éléments, nœuds, etc.

suivant une échelle géographique étendue ; mais ils doivent travailler ensemble et coopérer dans le but de développer des avantages concurrentiels communs afin de répondre aux variations du marché final. Ils doivent savoir s'articuler en amont et en aval avec les autres maillons de la chaîne via les différents flux, afin de satisfaire le client final tout en réduisant les coûts de la production.

Dans un monde concurrentiel, la solidarité des entreprises joue alors un rôle majeur pour réaliser ces objectifs. Cependant, un dysfonctionnement au niveau de l'un des maillons de la chaîne peut engendrer des dommages et des pertes pour la chaîne toute entière.

### 1.2.3 Les flux d'une chaîne logistique

Pour former une chaîne logistique, les entreprises, ou encore les maillons, sont reliées par des flux. Un flux se définit comme un déplacement d'éléments dans le temps et dans l'espace (Biteau et Biteau, 2003). Ces éléments peuvent être des produits, des informations ou encore de l'argent. Selon Mentzer et al. (2001), il existe trois types de flux :

- **Le flux des produits.** Il est appelé aussi le flux physique. Comme son nom l'indique, il représente la circulation des produits depuis les fournisseurs vers les clients. Dans le domaine de la production industrielle, ces produits peuvent être des matières premières, des composants, des sous-ensembles, des produits finis, etc. (Biteau et Biteau, 2003). Le flux des produits justifie l'organisation d'un réseau logistique, en d'autres termes les différents sites avec leurs ressources de production, les moyens de transports pour relier ces sites ainsi que les espaces de stockage nécessaires (Kallel, 2012).

Le sens de ce flux peut être inverse, si on considère le retour des produits lié au service après-vente ou au recyclage. Dans ce contexte, Samii (2001) parle de flux d'adéquation du marché.

Selon Baglin (1996) « l'écoulement des flux de matières, depuis les fournisseurs de matières premières jusqu'à la livraison des produits finis, en passant par les différentes opérations de fabrication, a bien peu en commun avec l'écoulement d'un fleuve tranquille. On se trouverait plutôt en présence d'un cours d'eau rencontrant de nombreux barrages, écluses et cascades tumultueuses ! ».

- **Le flux financier** ou monétaire qui circule dans le sens contraire au flux des produits (c'est-à-dire du client vers les fournisseurs). Il peut être mis en œuvre au moyen de supports papiers ou dématérialisé via un réseau numérique.

- **Le flux d'informations** circule dans les deux sens. Il comporte des données relatives aux marchés, tels que la variation de la demande à travers les commandes, les décisions d'entreprises, le niveau des stocks, le statut des commandes etc. Le flux d'informations est de plus en plus rapide grâce aux progrès des technologies d'information et de communication (ERP, DLP, RFID, etc.) (François, 2007).

La gestion adéquate des différents flux représente un facteur clef de la performance de la chaîne. Il faut que ces flux circulent d'une façon fluide tout en optimisant les différents coûts relatifs.

## 1.2.4 Les fonctions d'une chaîne logistique

Selon Lee et Billington (1993) et, Rota et al. (1998), la chaîne logistique doit assurer les fonctions approvisionnement des matières premières, transformation des matières premières en produits finis, et la distribution des produits finis aux clients. Dans la littérature, pour certains auteurs, à l'instar de François (2007) et Mouloua (2006), le terme fabrication est remplacé par production. Cette distinction permet de couvrir les produits tangibles et intangibles généralement sous forme de services.

**La fonction approvisionnement** concerne les flux amonts du maillon considéré. Elle se charge d'assurer la mise à disposition des intrants sous contraintes de réduire les coûts d'approvisionnement. Les intrants d'une entreprise sont constitués des matières premières et composants ainsi que des expertises nécessaires à la réalisation de la production de biens et de services. Cette fonction comporte l'achat et la gestion des stocks.

Pour s'approvisionner chaque entreprise doit déterminer le nombre et le type de produits à commander. Les types de produits peuvent être standards ou spécifiques, nécessitant dans ce cas le savoir-faire adéquat au niveau du processus de production. Il s'agit de choisir les fournisseurs possibles pour chaque composant. Ce choix est effectué principalement selon la quantité et la qualité des produits demandés et leur prix. D'autres facteurs interviennent pour effectuer ce choix, tels que la flexibilité du fournisseur et le délai de livraison qui représente le temps qui sépare la date de commande et celle de la livraison.

De même pour chaque composant, il faut déterminer le nombre de fournisseurs possibles ainsi que la quantité de produits à approvisionner par fournisseur. Pour certains produits, on se trouve limité par le nombre de fournisseurs (produit breveté, expertise technique spécifique, monopole) ce qui augmente le risque de pénurie de stocks dans la chaîne. Selon le type des produits, on peut se retrouver avec un grand nombre de fournisseurs ou avec un fournisseur unique. Les matériaux ou composants à durée de vie

courte (dans le cas des chaînes logistiques alimentaires par exemple) peuvent avoir un effet direct sur le risque de rupture du stock. Les cycles de vie des composants ou des matériaux ont un impact direct sur le risque d'obsolescence des stocks (Meyr et Stadler, 2008).

On cherche également à négocier les contrats (condition, types, durée, prix, etc.) et à optimiser les conditions d'achat (le prix, la qualité, le délai). Dans le cas des chaînes logistiques internationales (c'est-à-dire quand les sites sont localisés dans différents pays) il faut aussi prendre en compte le taux de change et les législations relatives à l'importation et l'exportation, procédures et réglementations douanières.

**La fonction production** consiste à produire les quantités de produits ou d'objets demandés en minimisant le coût, et en assurant une qualité optimale dans le temps voulu (Ghédira, 2006). La production de services ne nécessite pas forcément de transformation de matière.

La production d'un bien est la fonction de transformation des matières premières, passant par la fabrication et l'assemblage des pièces et des composants, l'emballage, et le conditionnement. Les produits résultant peuvent être semi-finis (destinés à d'autres usines pour subir d'autres transformations) ou des produits finis (destinés à la consommation). Pour ce faire, il faut mettre en œuvre des moyens nécessaires (humains, matériels, et techniques) et optimiser ces ressources afin d'assurer la compétitivité de l'entreprise et son développement.

En fonction de l'information sur la demande, Arda (2008) distingue deux types de productions : la production à la commande (make-to-order) et la production pour stock (make-to-stock). Dans le premier cas, la demande est connue au préalable. La production s'effectue alors pour répondre à une demande ferme ou actuelle. Dans le second cas, l'information sur les demandes futures n'est pas fiable. Il s'agit de produire pour renouveler ou pour satisfaire la demande anticipée.

Une défaillance au niveau de la production peut augmenter le prix de revient du produit fini ce qui diminuera les marges de gain, voire même les rendre négatives.

**La fonction distribution** concerne les flux aval du maillon considéré. Il s'agit d'organiser et de transporter des matières premières et des composants aux unités de production, et d'assurer la livraison des produits finis aux clients.

Parmi les problèmes liés à la distribution et au transport, il y a la recherche des meilleures combinaisons de routes pour collecter et/ou pour distribuer les produits : problèmes de routage des véhicules (vehicule routing problem) et l'optimisation des

quantités de produits qui doivent être transportés aux clients ainsi que le choix des meilleurs modes de transports (terrestre, maritime, fluvial, aérien, ferroviaire ou multimodale).

Ces différentes fonctions doivent être planifiées. En d'autres termes il est nécessaire de programmer la production, l'approvisionnement et la distribution des produits en se basant sur une demande ferme ou prévue des clients. La planification peut être faite à court, moyen, ou long terme en fonction des besoins des clients, des contraintes des fournisseurs, et des moyens de production et du stockage.

### **1.2.5 La structure d'une chaîne logistique**

Une chaîne logistique dans sa forme la plus simple peut se réduire à une relation binaire entre un client et un fournisseur, mais elle peut prendre des formes plus complexes comme des réseaux d'entreprises. Lin et Shaw (1998) présentent trois structures de chaînes logistiques classées selon la nature des relations qui lient les différentes entreprises membres : les structures convergente, divergente, et en réseau auxquelles Huang et al. (2003) rajoutent les structures dyadiques et séries.

- La structure dyadique ou binaire représente la liaison élémentaire. C'est une relation unique dont le type est donneur d'ordre – sous-traitant.
- La structure série nommée aussi structure chaîne, est composée de plusieurs liaisons dyadiques. On obtient ainsi une chaîne en série depuis le fournisseur jusqu'au client final.
- La structure convergente représente le cas des entreprises d'assemblage dont les pièces sont de diverses provenances et qui convergent vers un seul et même site qui est logiquement l'endroit où sera effectué l'assemblage. L'exemple le plus connu est celui de l'industrie de l'automobile.
- La structure divergente où la matière part d'un site et se distribue à travers la chaîne. Il s'agit par exemple des réseaux de distribution.
- La structure réseau, regroupe à la fois les aspects approvisionnement et distribution précédemment présentés.

La Figure 1-1 ci-après donne une représentation graphique de ces cinq formes de structures.

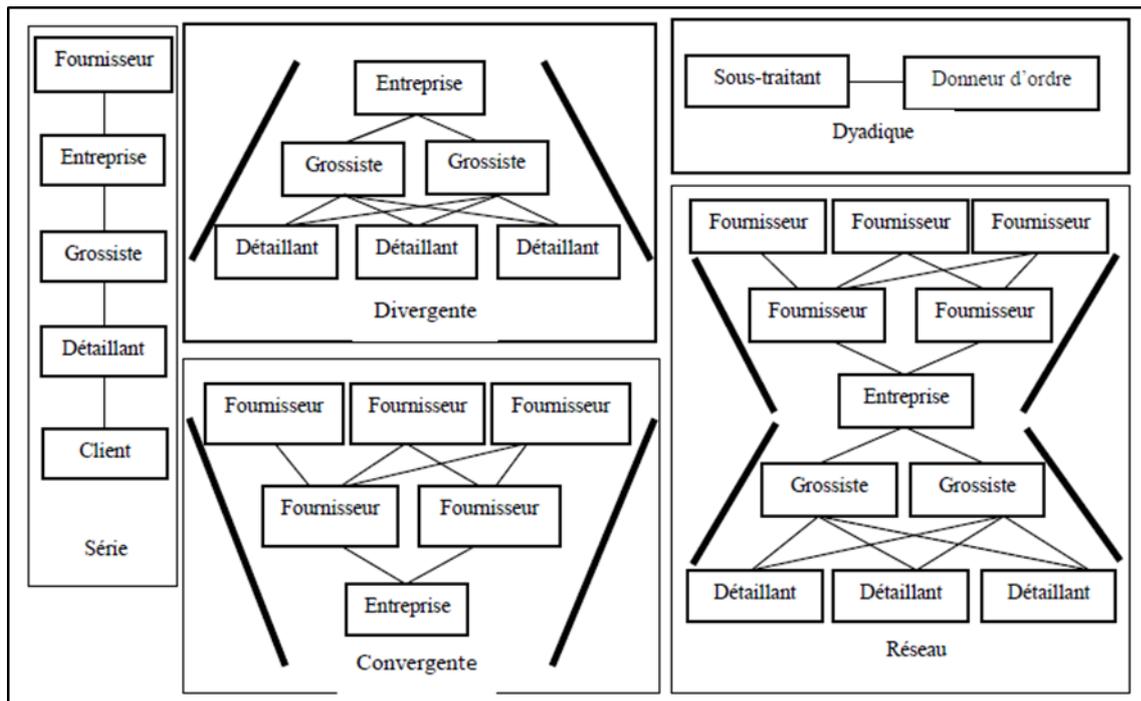


Figure 1-1 : Différentes structures de la chaîne logistique (Mahmoudi, 2006).

## 1.2.6 Les différents types des chaînes logistiques

Mentzer et al. (2001), classent les chaînes logistiques suivant trois types selon le niveau des intervenants (voir Figure 1-2). Ils distinguent la chaîne logistique directe, la chaîne logistique étendue et la chaîne logistique globale.

Une chaîne logistique est dite directe quand son réseau est formé par trois intervenants qui sont l'entreprise productrice, son fournisseur direct et son client final.

Quand on rajoute à cette chaîne directe trois autres catégories d'acteurs, qui sont le fournisseur du fournisseur ou le fournisseur final en amont ainsi que le client du client ou le client final en aval la chaîne logistique devient élargie.

Quant à la chaîne logistique globale, c'est une forme de réseau qui tient compte de tous les maillons impliqués dans la chaîne logistique.

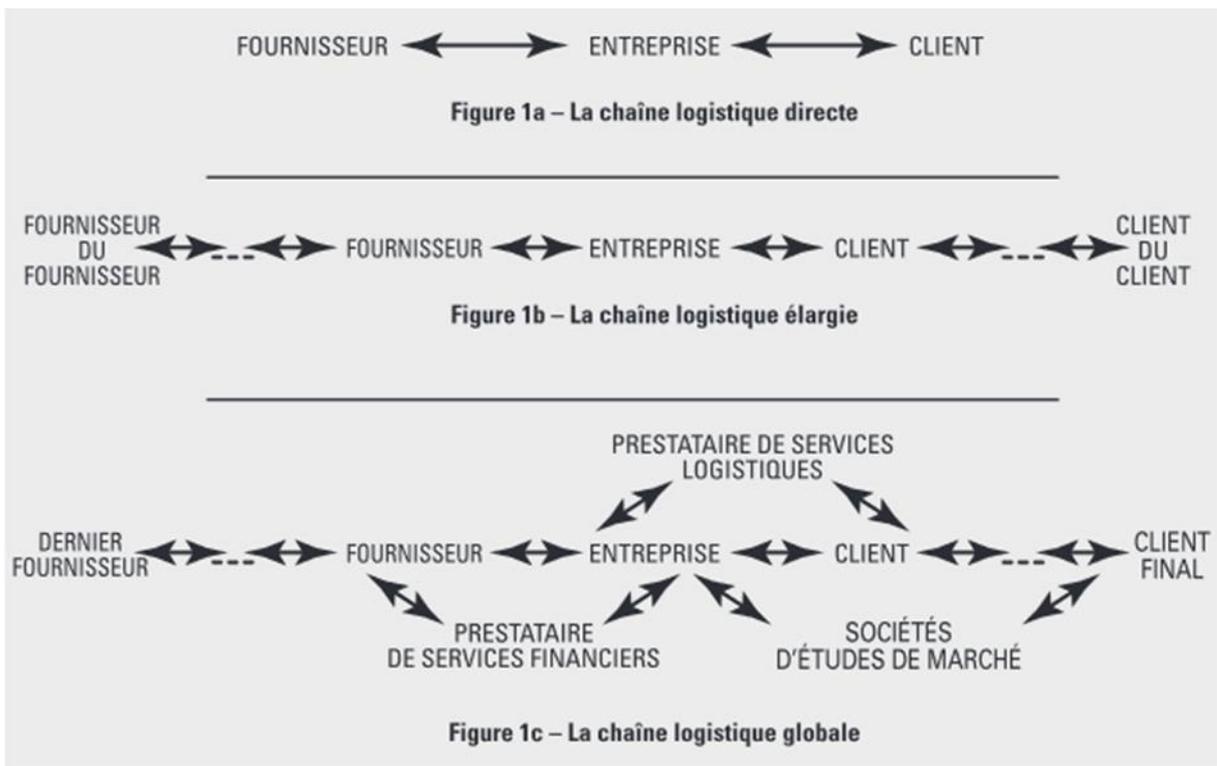


Figure 1-2 : Les trois types des chaînes logistiques selon Mentzer et al. (2001).

Il est à signaler que pour la référence de (Mentzer et al. 2001) les auteurs exigent l'existence d'au moins trois entités pour former une chaîne logistique.

En outre, le terme anglo-saxon "Global Supply Chain" se traduit par une chaîne logistique internationale ou mondiale. Dans ce cas, les différents sites sont localisés dans différents pays. Selon les objectifs de l'étude, il faut prendre en compte tous les aspects relatifs à l'importation et à l'exportation comme le taux de change, les taxes douanières, les assurances, et les législations.

Par ailleurs, et selon le point de vue organisationnel on parle aussi dans la littérature de la chaîne logistique interne. Ceci représente le cas où tous les partenaires appartiennent à la même entité juridique. Ceci inclut le cas où l'entreprise est multi-sites ou fédérale, c'est-à-dire dont la production est répartie sur plusieurs sites distingués géographiquement et qui font partie juridiquement d'une entreprise mère.

Deux autres terminologies existent pour décrire le réseau de chaîne logistique obtenu: l'entreprise étendue et l'entreprise virtuelle. Ces terminologies dépendent essentiellement de l'objectif de création de la chaîne logistique.

Gott (1996) considère l'entreprise étendue comme étant « Une sorte d'entreprise

représentée par toutes les organisations ou parties d'organisations : clients, fournisseurs, sous-traitants, engagés de façon collaborative à la conception, au développement et à la livraison des produits à l'utilisateur final ». Il s'agit d'un partenariat durable entre les entreprises qui collaborent au sein d'une chaîne logistique. Dans ce cas l'ensemble des entreprises partagent le système de gestion d'une façon plus ou moins complète (Hammami, 2003).

Si ce partenariat, entre l'ensemble des entreprises de la chaîne logistique qui s'engagent pour atteindre un objectif précis, est temporaire, on parle d'une entreprise virtuelle. Selon (Monteiro, 2001) ce groupement s'effectuent pour atteindre des capacités de production qu'elles ne peuvent atteindre seules ou pour faire face à la concurrence.

Nous résumons la classification des chaînes logistiques selon le point de vue organisationnel dans la Figure 1-3.

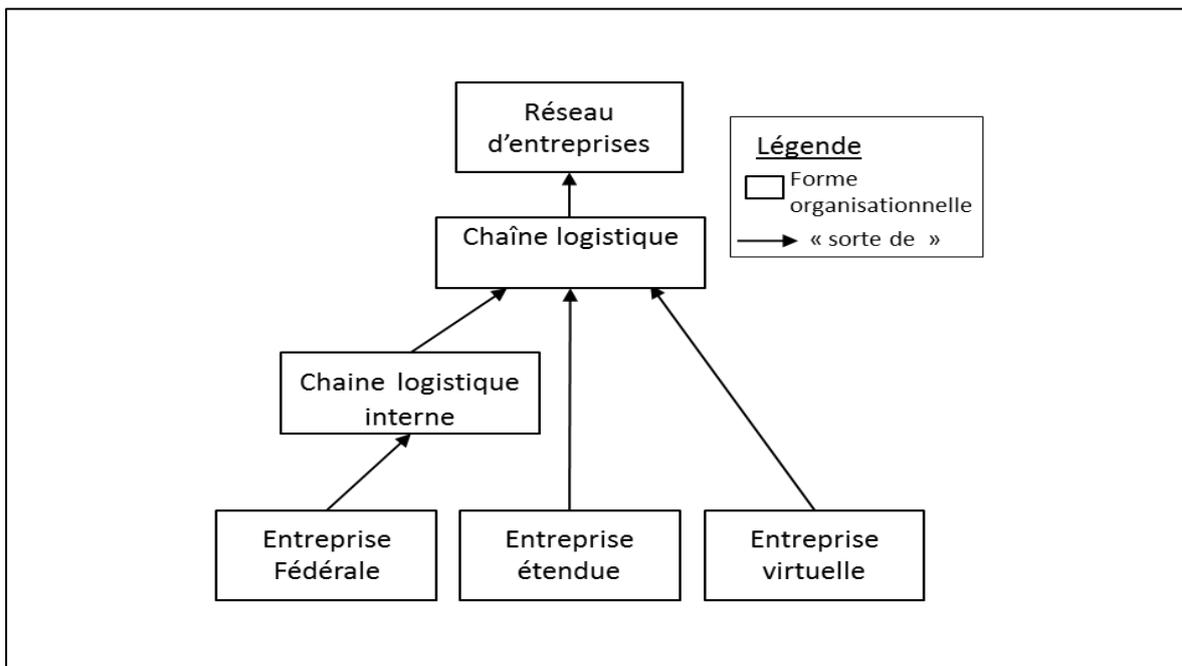


Figure 1-3 : Classification des chaînes logistiques selon la forme organisationnelle.

Cette figure montre que le terme « réseau d'entreprises » n'est pas forcément une chaîne logistique. En effet le **réseau d'entreprises** représente un « ensemble d'entreprises liées les unes aux autres par un cycle de production. Le lien n'est ni juridique, ni structurel ; il revêt souvent la forme de simples accords » (Butera, 1991). D'où le réseau n'est pas obligatoirement basé sur le processus d'élaboration complet d'un produit fini donné.

La chaîne logistique est ainsi un réseau complexe en termes de nombre d'intervenants

et de variété des relations. Par conséquent il est difficile à gérer. Pour cela, les différents acteurs de la chaîne logistique ont besoin de contrats<sup>2</sup> pour délimiter le cadre de la collaboration et veiller au bon déroulement des activités. Plusieurs types de contrats coexistent pour formaliser la nature des engagements qui lient les partenaires (contrats d'approvisionnement avec les fournisseurs, de rachat des produits excédentaires, pénalités de retard, des contrats d'externalisation d'une activité chez un prestataire, contrats de sous-traitance, etc.). Ces contrats fixent aussi la nature des échanges entre les acteurs.

## **1.3 La gestion de la chaîne logistique**

L'intérêt qu'accordent les entreprises aux chaînes logistiques se justifie par l'objectif de maximiser leur valeur ajoutée et leurs profits. L'atteinte de ces objectifs nécessitent bien évidemment une gestion optimisée de cette chaîne.

### **1.3.1 Le concept de la gestion de la chaîne logistique**

Selon Müller (2003) la gestion de chaînes logistiques en Anglais « Supply Chain Management » (SCM) peut être considérée comme un concept développé par les entreprises pour apporter une réponse personnalisée à une demande client en termes de qualité et de service.

Nous trouvons dans la littérature plusieurs définitions du concept de SCM sans qu'il y ait de consensus entre les auteurs. Toutefois, deux approches définitoires caractéristiques se dégagent.

La première approche s'appuie sur la notion de flux, en définissant le SCM comme étant la gestion des flux de matières, de produits et d'informations tout au long du système de valeur (Ellram et Cooper, 1990 ; Chopra et al., 2001; Lambert et al., 2005).

Dans la deuxième approche, nous trouvons celle de Ho et al. (2002) et de Mentzer et al. (2001) qui présentent la SCM comme étant une philosophie de management basée sur une coordination efficace entre l'ensemble des acteurs qui forment la chaîne logistique. La gestion de la chaîne logistique se définit comme « la coordination systémique et

---

<sup>2</sup> Un contrat est défini par Paché et Splanzani (2002) comme un instrument qui permet de mettre en pratique la forme organisationnelle retenue.

stratégique des fonctions opérationnelles classiques et de leurs tactiques respectives à l'intérieur d'une même entreprise et entre partenaires au sein de la chaîne logistique, dans le but d'améliorer la performance à long terme de chaque entreprise membre et de l'ensemble de la chaîne » Mentzer et al. (2001). L'objectif du SCM est de créer de la valeur pour le client et d'améliorer la performance du système qui consiste à produire et à distribuer les produits en bonne quantité, au bon endroit et au bon moment, tout en minimisant le coût total du service ou du produit fini et en assurant un niveau de service suffisant (Smichi-Levi et al, 2003).

### 1.3.2 Les niveaux décisionnels

L'ensemble des décisions prises par l'ensemble des acteurs de la chaîne, peuvent être structurées selon les trois niveaux hiérarchiques : stratégique, tactique et opérationnel (Ballou, 1999).

**Les décisions stratégiques** concernent les politiques à long terme (sur un horizon de plus de deux ans) de l'entreprise qui définissent les logiques entrepreneuriales et managériales à mettre en œuvre. Elles concernent :

- Les choix politiques d'investissement, de gestion et de conception du réseau logistique (Steadtler et Kilger, 2001),
- La définition du profil des partenaires, la localisation des infrastructures, la capacité requise par entité de prestation logistique,
- Le choix du type de gestion de production (fabrication à la commande, fabrication sur stocks,) (Miller, 2001),
- la reconfiguration d'un réseau existant (Pirard, 2005), etc.

**Les décisions du niveau tactique** concernent la planification à moyen terme (sur un horizon d'une semaine à quelques mois) des commandes et de la distribution, le choix des modes et des prestataires de transport et l'organisation dans le temps de leurs activités ainsi que la détermination du besoin en main d'œuvre (Miller, 2001).

**Les décisions opérationnelles** concernent la mise en place à court terme (sur un horizon d'un jour à une semaine) des actions planifiées au niveau tactique. Selon (Miller, 2001) les décisions opérationnelles concernent la gestion des priorités, l'équilibrage des flux, la gestion à court terme des stocks et l'ordonnancement des activités logistiques dans les entrepôts ou celles associées au routage des véhicules, etc.

### 1.3.3 La gestion des stocks

Le stock est « l'ensemble des marchandises, des matières ou fournitures, des déchets, des produits semi-ouvrés, des produits finis, des produits ou travaux en cours et des emballages commerciaux qui sont la propriété de l'entreprise » Ghédira (2006).

Disposer d'un stock « suffisant » signifie disposer des ressources nécessaires pour continuer à produire pendant une durée donnée. En effet, le stock permet de faire face, entre autres, aux variations des délais d'approvisionnement. Il permet également de maintenir une certaine indépendance entre les opérations et une souplesse d'ordonnancement (durant la phase de production). De même, le stock donne à une chaîne logistique une plus grande réactivité face aux variations de la demande du marché et par conséquent, il augmente sa qualité de service.

En contre partie, le stock représente une immobilisation financière pouvant être très importante, d'où la nécessité d'une gestion efficace des stocks et de l'approvisionnement dans chaque entreprise de la chaîne. Une gestion dont le rôle est « d'assurer à la production la disponibilité des produits dont elle a besoin et au moment où elle en a besoin » et « au cours de laquelle il faut définir les politiques de gestion des stocks, définir sur quels produits s'appliquent ces politiques, déterminer ce qu'il faut approvisionner et gérer les entrées et sorties physiques du stock », Ghédira (2006).

Arda (2008), Jemai (2003) et Babai (2005) présentent un état de l'art sur les différentes politiques de gestion des stocks et d'approvisionnement. Les politiques de gestion des stocks dépendent principalement sur la fiabilité de l'information sur la demande (Jemai, 2003). L'information sur la demande peut être connue au préalable (une commande ferme), prédite ou tout simplement inconnue (absence d'information) (Babai 2005).

D'une façon générale, les politiques de gestion des stocks des approvisionnements se distinguent par la date de réapprovisionnement et la quantité à commander. Les décisions seront prises après avoir examiné le niveau du stock. Selon Jemai (2003) le suivi de niveaux du stock s'effectue :

- d'une façon continue, ainsi la décision de réapprovisionnement peut intervenir à tout instant
- d'une façon périodique, ainsi la décision de réapprovisionnement sont prises à chaque période.

Nous avons résumé dans le tableau 1.1 les différentes politiques classiques de gestion des stocks obtenues en combinant une réponse à chacune des deux questions « Quand

commander ? » et Combien commander? ».

Politique	Quand on commande?	Combien on commande?
(r, Q)	A chaque fois où la position du stock est en dessous de r (r = seuil de commande)	Une quantité fixe Q
(s, S)	Dès que la position du stock descend en dessous du seuil de commande s	Une quantité de manière à ramener la position du stock à S
(T, S)	Début de chaque période de longueur T	Une quantité de manière à ramener la position du stock à S
(T, r, S)	Fin de chaque période de suivi T, et si le stock est inférieur à r	Une quantité de manière à ramener la position du stock à S
(T, r, Q)	A chaque période T si la position du stock descend en dessous du seuil r	Une quantité fixe Q

Tableau 1 : Politiques classiques de gestion des stock.

La politique d'ordre stock nominal « Base Stock policy » est une des politiques de gestion de stock les plus rencontrées dans la littérature, Babai (2005). Cette politique de gestion de stock classique suppose qu'on ne dispose pas d'une information sur la demande. Elle consiste à satisfaire la demande à partir du stock disponible dès son arrivée et à lancer un ordre de fabrication dans tous les étages concernés. Si la quantité du stock disponible ne suffit pas pour satisfaire toutes la demande, cette dernière serait mise en attente ou perdue (Jemai, 2003).

A ces politiques classiques se rajoute celles de la méthode de gestion MRP (Material Requirements Planning) et les politiques basés sur Kanban.

### **Méthode MRP**

La méthode MRP a comme objectif d'assurer la disponibilité des composants dans chaque entreprise de la chaîne logistique ainsi que les produits finis « juste à temps ». Elle consiste à déterminer, pour chaque produit et à chaque période d'horizon donné, les dates et les quantités desancements de production ou des commandes d'approvisionnement, et ce pour satisfaire les besoins en produits finis exprimés dans ce qu'on appelle le Plan Directeur de Production (PDP). Le plan PDP est défini sur un intervalle de temps appelé « horizon », et est déterminé en fonction des commandes fermes ou prévisionnelles selon le mode de production (Arda, 2008). En utilisant la nomenclature, ces besoins seront transformés en besoins de produits semi-finis et de composants. En effet chaque nomenclature, est une structuration en arborescence des produits permettant d'indiquer les produits d'un niveau qui entrent dans la fabrication d'un produit de niveau directement inférieur. Ensuite, ces besoins en composants seront transmis à chaque niveau de la chaîne logistique avec un décalage temporel afin de prendre en compte les

temps des productions de chaque composant.

En se basant sur cette méthode, Lee et al. (1997) présentent une politique de gestion du stock sur prévision appelée politique avec niveau de rechargement « Order-Up-To-Level policy ». Cette méthode consiste à commander, chaque période, une quantité qui correspond à la différence entre le niveau de rechargement  $S$  et la position du stock  $I$ , et la quantité commandée est livrée après le délai d'approvisionnement  $L$ , Babai (2005).

### **Politiques Kanban**

D'autres politiques du stockage sont mises en œuvre par des gestionnaires afin d'optimiser les coûts même si ces politiques sont plus « risquées ». C'est le cas de la politique Kanban et ses extensions qui se basent sur une philosophie inventée par Toyota Motors, connue par la technique « juste à temps » en anglais « just in time » (JIT). L'objectif de cette philosophie est tout simplement de minimiser le niveau du stock pour réduire le coût des stockages. Son principe consiste à coller une « étiquette » ou Kanban en japonais, à une pièce ou un lots de pièces, déclenchant sa production.

Pour plus de détail sur le déroulement de ces différentes politiques du stockage et d'approvisionnements nous invitons le lecteur à se référer à (Arda, 2009), (Babai, 2005) et (Jemai, 2003).

## **1.4 Modélisation et évaluation des performances**

Les chaînes logistiques sont des systèmes jugés complexes (Mouloua, 2007). Afin de maîtriser cette complexité, plusieurs modèles ont été développés dans le but d'étudier leur comportement et d'aider à la prise de décision. Selon Labarthe (2006) « modéliser une chaîne logistique consiste à décrire sa structure et son fonctionnement afin de l'étudier en vue d'améliorer ses performances et sa position concurrentielle ». Comme le décrit (Mustapha, 2011) « la modélisation est un processus de représentation qui permet d'obtenir une image approchée du système réel suite à une phase d'abstraction ». Le choix d'une approche de modélisation est conduit par la nature des entrées et l'objectif de l'étude (Beamon, 1998). Nous présentons dans ce qui suit trois types de modélisations qui sont la modélisation conceptuelle, la modélisation analytique et la simulation (Mouloua, 2007).

### **1.4.1 Les modèles conceptuels**

Un modèle conceptuel est un modèle descriptif, pouvant être représenté sous forme de diagrammes qui montre les éléments clés (ou concepts) d'un système (ou d'un domaine)

ainsi que les relations (sémantiques) hypothétiques qui les lient. L'objet d'un tel modèle est d'exprimer sans ambiguïté le sens des termes et des concepts afin de mieux préciser les problèmes qui peuvent émerger des dits systèmes ou domaines. Il peut être exprimé au moyen d'outils comme UML pour la modélisation de type objet, ou IDEF1X pour la modélisation de type Entité - Relation. L'élaboration d'un modèle conceptuel s'effectue sur la base d'une revue de littérature en sélectionnant les documents les plus pertinents qui traitent du problème investigué dans le domaine considéré. L'hypothèse sous-jacente est que ce corpus de documents couvre de façon exhaustive le domaine et le problème. La modélisation conceptuelle est une phase importante du processus plus général de modélisation, du fait qu'elle permet de représenter le plus fidèlement possible les caractéristiques intrinsèques d'un système dans un format facilement accessible. Il s'agit de donner une description basique et simplifiée d'un système sous formes de diagrammes ou d'explications verbales en cherchant un bon équilibre entre précision et aisance de communication (Mouloua, 2007). Dans cette catégorie nous trouvons le modèle SCOR que nous allons détailler dans le paragraphe §1.4.4 et la figure suivante proposé par Hammami (2003) pour modéliser une chaîne logistique.

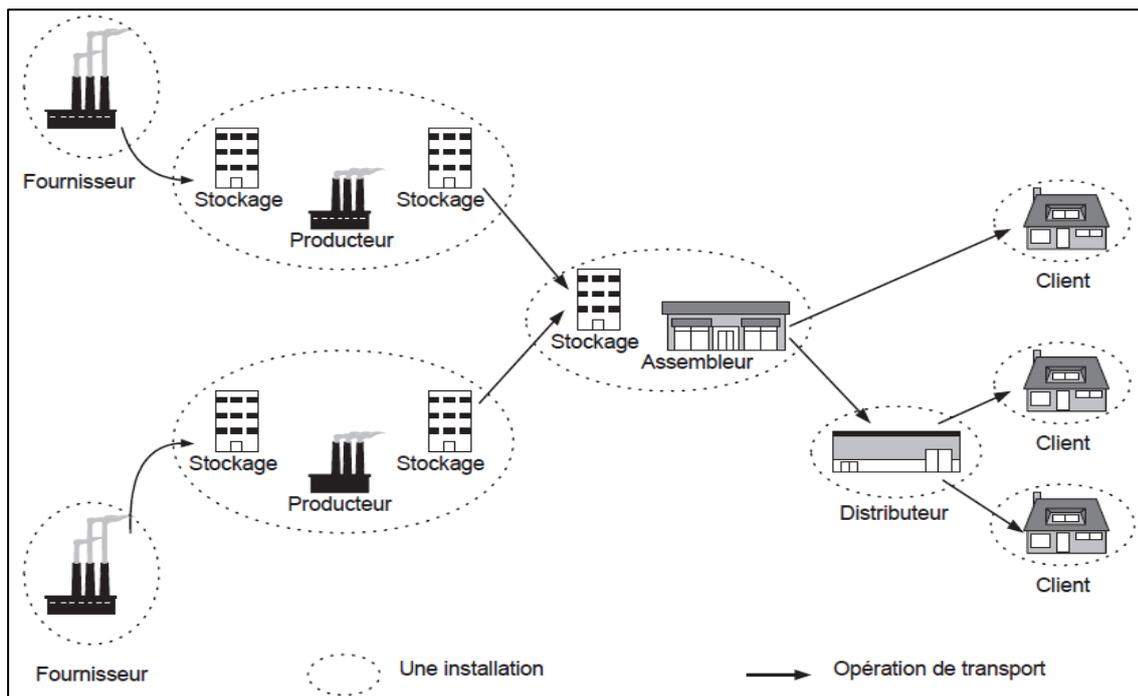


Figure 1-4 : Chaîne logistique, (Hammami, 2003).

Cette figure schématise les fonctions que doit assurer les différents acteurs qui sont liées par des opérations de transport des matières premières, des produits semi-finis et des produits finis. Dans cet exemple, les matières sont acheminées, depuis les fournisseurs via les transporteurs, vers les manufacturiers. A ce niveau industriel les

matières premières passent par différentes étapes de transformations pour obtenir des produits intermédiaires. Les produits intermédiaires sont ensuite livrés vers le prochain niveau industriel où ils seront assemblés pour obtenir les produits finis. Ces derniers seront directement distribués au client final ou transportés vers les centres de distribution, où ils seront stockés avant d'être dirigés vers les clients.

## **1.4.2 Les modèles analytiques**

La modélisation analytique a pour objet de décrire les entités du système et leurs relations à l'aide d'équations mathématiques afin de résoudre les problèmes d'une manière quantitative. Quand tous les paramètres du modèle sont connus on parle de modèles déterministes. En revanche, s'il existe des paramètres aléatoires on parle de modèles probabilistes. Ces derniers constituent un champ important de recherche notamment en ce qui concerne le problème de la planification dans les chaînes logistiques en prenant en compte le caractère aléatoire de la demande. À titre d'exemple, nous pouvons citer les modèles fondés sur :

- la théorie des jeux, (Arda, 2008; Mahjoub et Henet , 2012 ; Jemai, 2003)
- les réseaux de files d'attentes, (Cheyroux, 2003 ; Jemai, 2003 ; Arda et Henet, 2006)
- les réseaux de Petri, (Labadi, 2005 ; Chen et al, 2005)
- la recherche opérationnelle, les séries temporelles et les chaînes de Markov, (Graves, 1999; Gilbert, 2004; Babai et al., 2010 ; Henet et al., 2010)
- etc.

Les modèles analytiques se basent souvent sur des hypothèses de linéarisation du comportement du système. Ils sont généralement trop complexes pour représenter une chaîne logistique dans toute sa complexité (et ses dimensions) et peu pratiques pour être résolus (Thierry et al., 2008). Ceci limite leur utilisation principalement pour le calcul des performances du système dans un état stable (Arda et Henet, 2008).

Pour ces raisons, la modélisation analytique est souvent couplée à la simulation. Ce choix est pris non seulement pour modéliser des systèmes complexes mais aussi afin de gérer le comportement aléatoire des chaînes logistiques avant leur implantation (Lee et al., 2002).

## **1.4.3 Les modèles de simulation**

« La conduite de simulations permet une observation du comportement et de la dynamique du système par rapport au temps. » (Mustapha, 2011). Les modèles de simulation sont utiles dans le domaine de la gestion des chaînes logistiques et de

l'évaluation de leurs performances (Labarthe et al., 2007).

Labarthe (2006) indique que la plus part des travaux de simulation de chaînes logistiques se basent sur des modèles à événements discrets (variables discrètes ou phénomènes continus discrétisés). Les modèles à événements discrets ont l'avantage de tenir compte de systèmes plus complexes du fait qu'ils ont la capacité de prendre en compte le comportement non linéaire de ces systèmes (Tounsi, 2011).

## 1.4.4 Le modèle SCOR

En 1996, le Supply Chain Council propose un modèle conceptuel de la chaîne logistique baptisé le modèle SCOR (Supply chain Operations Reference). Il est considéré comme un outil de modélisation standardisé pour permettre la description et l'évaluation des flux d'une chaîne logistique. Le modèle SCOR repose sur quatre processus de base : approvisionner, produire, livrer et gérer les retours. Ces différents processus doivent être coordonnés et font l'objet du processus « planifier ». C'est le sens de la flèche de couleur orange, orientée vers le haut, dans la Figure 1-5.

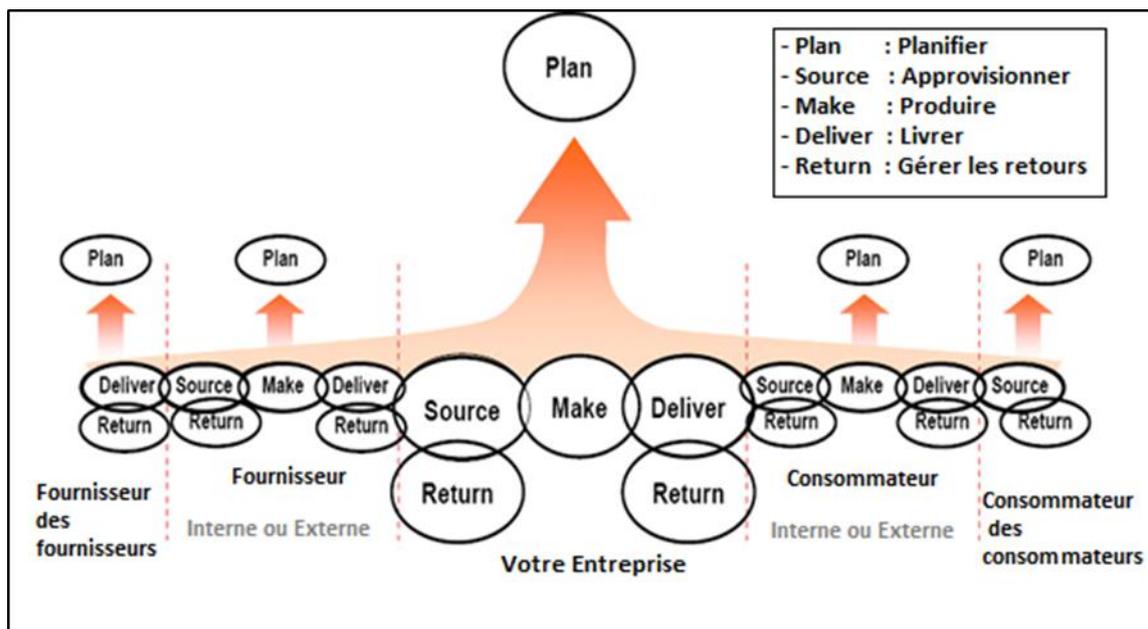


Figure 1-5 : Le modèle SCOR

Selon le Supply Chain Council ces processus sont décrits comme suit :

- Planifier (« Plan ») est le processus qui permet d'équilibrer la demande et les approvisionnements pour développer un plan d'actions. Ce plan tiendra compte des approvisionnements, de la production et des besoins en livraisons ;

- Approvisionner (« Source ») est le processus permettant l'approvisionnement des biens et des services pour satisfaire la demande prévisionnelle ou réelle ;
- Produire (« Make ») c'est le processus de transformation des produits à un état fini pour satisfaire une demande prévisionnelle ou réelle ;
- Livrer (« Deliver ») est le processus de Livraison des produits finis ou services pour satisfaire la demande réelle ou prévisionnelle en incluant typiquement, la gestion des commandes, la gestion du transport et la gestion de la distribution ;
- Gérer les retours (« Return ») est le processus associés au retour ou à la réception de produits retournés pour diverses raisons.

## 1.4.5 Evaluation des performances

L'étude de la performance permet de déterminer l'efficacité et/ou l'efficience des chaînes logistiques qui sont souvent constituées de différentes entreprises. Elle est utilisée également pour comparer les systèmes alternatifs concurrents.

La littérature disponible classe les mesures de performances en deux catégories :

- Les indicateurs qualitatifs : ce sont des mesures basées sur le jugement ou la perception.
- Les indicateurs quantitatifs : qui peuvent être des mesures numériques ou statistiques et qui sont souvent exprimées en termes d'unités d'analyse (le nombre de, la fréquence de, le pourcentage de, le ratio de, l'écart par rapport à, etc.).

Les premières mesures de performance ont porté sur la caractérisation des processus de façon individuelle tels que la production, la distribution, ou la gestion des stocks. Elles prenaient en compte les aspects qualité, temps, coût et flexibilité qui représente la capacité de la chaîne à répondre rapidement aux variations de son environnement.

Beamon (1998) suggère de se concentrer sur des mesures concernant les ressources (Coût total, coût de distribution, coût du stockage), la production (d'une façon quantitative comme le nombre d'articles produits, le nombre de livraisons dans les délais, le bénéfice, ou d'une façon qualitative comme la satisfaction du client ou la qualité) et la flexibilité (flexibilité au niveau des quantités, des modes de livraison, de la production de produits variés et de produits nouveaux).

Le tableau suivant présente cinq attributs de performance proposée par le modèle SCOR. Ces attributs sont la fiabilité, la réactivité, la flexibilité, les coûts et la gestion d'actifs.

Domaine de performance	externe	Fiabilité	Livraison du bon produit au bon endroit au bon moment avec la bonne qualité
		Réactivité	Délai de traitement des commandes et de mise à disposition chez le client
		Flexibilité	Temps de réponse aux changements du marché pour maintenir ou gagner un avantage concurrentiel
	interne	coût	Le coût associé aux opérations totales de la chaîne logistique
		Actifs	L'efficacité dans la gestion des actifs (capitaux fixes et encours) supportant la satisfaction de la demande

Tableau 2 : Attributs de performance proposés par le modèle SCOR.

SCOR identifie plus de 200 indicateurs clefs de performance (KPI) permettant surveiller le rendement global de la chaîne logistique et aider à l'amélioration d'un processus spécifique tel que le pourcentage des demande satisfaites à temps (pour le client), le pourcentage des commandes satisfaites à temps (par le fournisseur), exactitude des prévisions, etc. Certains indicateurs ont été traités dans la littérature tels que la capacité de réduction de niveau du stock global détenue dans la chaîne logistique (Viswanathan et al., 2007), temps d'attente de client, nombre des demandes reportées ou non satisfaites (Yee, 2005).

Les indicateurs de performances aident les gestionnaires de la chaîne logistique à contrôler la chaîne pour atteindre des objectifs définis ou de modifier les objectifs eux-mêmes.

## Discussion

Le domaine des chaînes logistique est très large faisant intervenir des connaissances de plusieurs domaines de recherche (Finance, sciences de gestion, génie industriel, génie informatique, etc.). Ainsi nous trouvons dans la littérature des définitions et des concepts qui dépendent principalement de la discipline dont les chercheurs sont issus et les objectifs qui orientent leur analyses. Ces définitions et ces concepts prêtent parfois à confusion pour les non connaisseurs de domaine. Par exemple, si nous reprenons la Figure 1-4. où les différents maillons sont représentés par leurs activités (producteur, assembleur, distributeur) ainsi que leurs rôles joués (fournisseur, client), nous pouvons aussi voir que le producteur est lui même le fournisseur de l'assembleur, et de même, l'assembleur peut se considérer comme le client du producteur.

Il nous paraît fondamental de passer par une analyse ontologique des différentes définitions des chaînes logistiques pour pouvoir extraire les caractéristiques clés de ce domaine et pour pouvoir par la suite étudier les risques des chaînes logistiques.

## 1.5 Analyse ontologique

### 1.5.1 Présentation d'une analyse ontologique

Le terme « Ontologie » (avec un O majuscule) prend ses racines dans la métaphysique grecque où il désigne la branche de la philosophie connue comme « la science de l'être » (Oxford Dictionary, 2008)(ISCID Encyclopedia, 2008) qui étudie l'être en tant qu'être, et les attributs qui lui appartiennent essentiellement (Aristote). En d'autres termes, qu'est-ce qui caractérise un être, qui fait ce qu'il est et qui le distingue des autres êtres. En formalisant la nature des choses et ce qui les distingue, l'Ontologie est appliquée à des domaines tels que la Théologie, les Sciences de l'Information et l'Intelligence Artificielle (ISCID Encyclopedia, 2008).

En informatique, le terme *ontologie* (avec un o minuscule) est souvent associé aux connaissances relatives aux objets d'un univers délimité et à leurs relations. L'ontologie se réfère à un langage conceptuel utilisé pour la description de cet univers (le domaine). Selon (Gruber, 1993), une ontologie est un langage permettant de spécifier explicitement une conceptualisation, définie comme une vue simplifiée d'un monde que l'on veut représenter dans un certain but en utilisant des concepts et leurs relations. En 1997, Borst rajoute l'idée qu'une ontologie doit être partagée : « une ontologie est une spécification formelle d'une conceptualisation partagée » (Borst, 1997). Pour (Uschold et Grüninger, 1996), un des objectifs des ontologies est de faciliter les échanges de connaissances entre humains, entre humains et machines ainsi qu'entre humains par l'intermédiaire de machines. Ainsi, depuis les années quatre-vingt-dix, des êtres artificiels sont construits sur la base d'ontologies qui constituent, alors, les fondements de ces être et font d'eux ce qu'ils sont.

Dans le cadre des travaux de cette thèse, nous n'avons pas pour objectif de construire l'ontologie du domaine des chaînes logistiques. Notre volonté est de mettre en exergue les différences qui peuvent apparaître au niveau des définitions proposées par les acteurs du domaine. Les questions auxquelles nous voulons répondre, par cette analyse, sont de savoir si ces différences sont fondées sur de véritables différences conceptuelles profondes, ou bien, ne sont-elles que les différents aspects complémentaires d'une même réalité. Ainsi, notre analyse ontologique est dans l'esprit de la définition de (Gruber, 1993), avec comme intention d'aboutir à une conceptualisation commune. Au terme de cette analyse, nous proposerons un modèle conceptuel du domaine des chaînes logistiques grâce auquel nous positionnerons la suite de nos travaux et en particulier, nous justifierons le choix des variables retenues pour les modèles de simulation.

## 1.5.2 Le processus d'élaboration des ontologies

Les travaux réalisés en Génie Ontologique ont permis de mettre en évidence cinq étapes principales pour le développement d'une ontologie (Gandon, 2002):

1. *Spécification de l'ontologie.* Le but de cette étape est de fournir une description claire du problème étudié et la façon de le résoudre. Il s'agit de préciser l'objectif, la portée et le degré de granularité de l'ontologie qu'on vise à construire.
2. *Définition du corpus.* Dans cette étape, les différentes sources de connaissance permettant de répondre aux objectifs de l'étude seront sélectionnées. Cette étape a été décrite, par exemple, dans la méthode TERMINAE (Aussenac et al., 2000).
3. *Étude linguistique du corpus.* Durant cette étape le corpus est analysé pour en extraire les termes porteurs de connaissance ainsi que les relations qui les lient. Cette étape a été proposée dans la méthode TERMINAE et celle de Dahlgren (1995). La linguistique est spécialement concernée par le domaine de l'ontologie dans la mesure où les données disponibles sont souvent exprimées en langage naturel (Aussenac et al., 2000). La caractérisation du sens de ces expressions conduit à déterminer les significations contextuelles.
4. *Conceptualisation.* Lors de cette étape, il s'agit de transformer les termes obtenus au terme de l'étude linguistique du corpus : les termes seront transformés en concepts et les relations lexicales en relations sémantiques. Au terme de cette étape, un modèle conceptuel est obtenu. Cette étape fut proposée par les méthodes : ENTERPRISE (Uschold et King, 1995), METHONTOLOGY (Fernández et al., 1997), TERMINAE.
5. *Formalisation.* Cette étape a pour objectif d'exprimer au moyen d'un langage formel le modèle conceptuel obtenu suite à l'étape précédente. Cette étape fut proposée par les méthodes : ENTERPRISE, METHONTOLOGY, TERMINAE.

Pour nous aider dans la mise en œuvre de ces étapes, nous avons utilisé la méthode Knowledge Oriented Design (KOD). Au cours de l'Annexe1, nous présentons la méthode KOD et nous montrons de quelle façon elle se projette sur les cinq étapes du processus d'élaboration des ontologies.

## 1.5.3 Analyse ontologique des chaînes logistiques

Au cours de ce paragraphe, le processus d'élaboration d'ontologies avec KOD est mise en œuvre en considérant le corpus constitué par les différentes définitions des chaînes logistiques issues de la littérature.

### **1.5.3.1 Spécification**

La méthode KOD n'offre pas d'outil facilitant la spécification d'une ontologie. Pour mener à bien cette étape, de nombreux auteurs recommandent d'utiliser le concept de scénario (Uschold et Grüninger, 1996)(Carroll, 1997)(Gandon, 2002), avec pour objectif de clarifier et de justifier les raisons de construire une ontologie, ses futures utilisations et ses futurs utilisateurs.

Dans ce sens, le domaine est celui des chaînes logistiques, notre objectif consiste à modéliser les connaissances de ce domaine. Nous cherchons à rapporter de la clarté à ce domaine en identifiant ses concepts clés, et en expliquant ses caractéristiques.

### **1.5.3.2 Le corpus des définitions**

L'analyse ontologique que nous avons menée repose sur un corpus de définitions (Tableau 3) complété de documents qui précisent le sens de chacun des termes présents dans ces définitions. Ces documents additionnels peuvent être issus des mêmes auteurs ou bien d'auteurs ayant analysé et discuté ces mêmes définitions comme l'ont fait (Mahmoudi, 2006) et (Amrani, 2009).

L'intérêt de considérer, comme point de départ, un corpus de définitions est qu'elles sont, par essence, une vision conceptuelle de leur auteur. C'est à dire, qu'elles sont déjà l'aboutissement d'un travail d'abstraction et de réflexion sur le domaine. D'autre part, ce choix est conforme aux objectifs de cette analyse qui sont d'acquérir une vision claire, globale et précise du domaine sans vouloir en construire une ontologie détaillée.

Devant la grande quantité de définitions, qu'il ressort de la revue de littérature, notre choix s'est fondé sur les critères suivants :

- la reconnaissance des auteurs (et donc de leurs définitions) par la communauté scientifique. Ainsi, nous avons retenu les définitions des auteurs qui sont le plus souvent référencés ;
- l'exclusion des points de vue financier et économique puisque hors de notre champ disciplinaire de compétence ;
- le respect des critères de classification de Thierry et Bel (2001) qui distinguent les points de vue « entreprise » et « produit » ;

Selon le point de vue « entreprise », la chaîne logistique est appréhendée de proche en proche en se focalisant sur chaque entreprise et en déterminant l'ensemble des autres entreprises qui sont reliées à elle (suivant le lien client-fournisseur) indépendamment du produit à réaliser. Dans ce cas la chaîne logistique peut être limitée à un client et un

fournisseur ou au contraire, elle peut être étendue du fait qu'on peut toujours identifier les fournisseurs du fournisseur et les clients du client.

Selon le point de vue « produit », les différents acteurs de la chaîne logistique et les différentes activités sont identifiés en suivant un produit de son état initial (souvent sous forme de matière première) jusqu'à son état final (le produit fini chez le client). La chaîne est appréhendée ainsi de bout en bout relativement au produit considéré.

Lee et Billington (1993)	« Un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution des produits finis vers le client. »
La Londe et al. (1994)	« Une chaîne logistique est un ensemble d'entreprises qui se transmettent des matières. En règle générale, plusieurs acteurs indépendants participent à la fabrication d'un produit et à son acheminement jusqu'à l'utilisateur final (producteurs de matières premières et de composants, assembleurs, grossistes, distributeurs et transporteurs sont tous membres de la chaîne logistique). »
Ganeshan et Harrison, (1995)	« la chaîne logistique est un réseau d'entités de production et de sites de distribution qui réalise les fonctions d'approvisionnement de matières, de transformation de ces matières en produits intermédiaires et/ou finis, et de distribution de ces derniers jusqu'aux clients. »
Rota (1998)	« l'ensemble des entreprises qui interviennent dans les processus de fabrication, de distribution et de vente du produit, du premier des fournisseurs au client ultime »
Tsay et al. (1999)	« un ensemble de deux ou plusieurs entreprises liées par des flux de marchandises, d'informations et financiers. »
Stadler et al (2000)	« Une chaîne logistique est constituée de deux ou plusieurs organisations indépendantes, liées par des flux physique, informationnel et financier. Ces organisations peuvent être des entreprises produisant des composants, des produits intermédiaires et des produits finis, des prestataires de service logistique et même le client final lui-même »
Mentzer et al., (2001)	« La CL est un groupe d'au moins trois entités directement impliquées dans les flux amonts et avals de produits, de services, de finances et/ou d'informations, qui vont d'une source jusqu'au client. »
Lummus et Vokurka (2004)	« Toutes les activités impliquées dans la livraison d'un produit depuis le stade de matière première jusqu'au client en incluant l'approvisionnement en matières premières et produits semi-finis, la fabrication et l'assemblage, l'entreposage et le suivi des stocks, la saisie et la gestion des ordres de fabrication, la distribution sur tous les canaux, la livraison au client et le système d'information permettant le suivi de toutes ces activités »
Supply Chain Council (2004)	« La Supply Chain est la suite des étapes de production et distribution d'un produit depuis les fournisseurs des fournisseurs du producteur jusqu'aux clients de ses clients »

Tableau 3 : Corpus des définitions des chaînes logistiques.

### 1.5.3.3 Analyse linguistique du corpus

L'étude linguistique conduit à l'élaboration des Modèles Pratiques (Figure 1.6) suivant deux étapes : (i) une analyse terminologique des documents du corpus, suivie (ii) d'une modélisation sous forme de Taxèmes, d'Actèmes et d'Inférences.

L'analyse terminologique a pour objet d'extraire de chaque document (définition) les termes représentatifs du domaine ainsi que les relations qui les lient. Les termes peuvent représenter des objets, des comportements, des actions ou des inférences conformément aux trois paradigmes de la méthode. L'analyse consiste à paraphraser les documents (définitions) du corpus pour obtenir des phrases simples permettant de qualifier les termes employés. Chaque paraphrase fait ensuite l'objet d'une modélisation suivant le formalisme du taxème, de l'actème ou de l'inférence. Nous construisons ainsi un langage terminologique où les termes peuvent être des objets, des valeurs, des relations liant les objets aux valeurs, des actions et des inférences.

Pour la présentation qui suit et ce pour chacun des points de vue (produit et entreprise), le cas d'une définition fera l'objet d'une analyse détaillée alors que pour les autres définitions, les résultats seront simplement présentés.

### 1.5.3.4 Analyse du corpus selon le point de vue « produit »

#### a. Textes originaux

Considérons la définition de Lee et Billington (1993) :

*« La Chaîne Logistique est un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution des produits finis vers le client ».*

Ainsi que les interprétations selon Botta-Genoulaz (2005) et Bouchriha (2007) où les installations en question peuvent être des *unités du stockages* (entrepôts, magasin central), des *unités de productions*, un ensemble *d'unités du stockage et de productions* (usines, ateliers), des *fournisseurs*, des *distributeurs*, le *client*, etc.

La définition de Lee et Billington (1993) se focalise sur les fonctions (activités) de la chaîne logistique alors que l'interprétation de Botta-Genoulaz et Bouchriha est une précision du seul terme (concept) installation.

## **b. Production des paraphrases**

A partir des textes ci-dessus, nous pouvons produire les paraphrases suivantes.

- La Chaîne Logistique est un réseau d'installations,
- La Chaîne Logistique assure la fonction d'approvisionnement en matières premières,
- La Chaîne Logistique assure la fonction de transformation des matières premières en composants,
- La Chaîne Logistique assure la fonction de transformation des composants en produits finis,
- La Chaîne Logistique assure la fonction de distribution des produits finis vers le client,
- Une installation est une unité du stockage,
- Un entrepôt est une unité du stockage,
- Un magasin central est une unité du stockage,
- Une unité de production est une installation,
- Un fournisseur est une installation,
- Un distributeur est une installation,
- Le client est une installation,
- Un ensemble d'unité du stockage et de production est une installation,
- Une usine est un ensemble d'unité du stockage et de production,
- Un atelier est un ensemble d'unité du stockage et de production,

## **c. Modélisation sous forme de Taxèmes**

La modélisation sous forme de Taxèmes consiste à organiser les termes des paraphrases représentant des objets et des concepts au moyen de prédicats binaires de type < Objet, Attribut, Valeur >. On définit cinq types de relations prédictives : les relations Classifiante (*est-un, sorte-de*), Identifiante (*est*), Descriptive (*nom de la propriété*), Structurelle (*est-composé-de*) et Situative (*est-dans, est-sur, etc.*). D'où les taxèmes suivants issus des paraphrases :

- < Chaîne Logistique, *sorte-de*, Réseau d'Installations >
- < Réseau d'installations, *est-composé-de*, Installations >
- < Unité du stockage, *sorte-de*, Installation >
- < Entrepôt, *sorte-de*, Unité du stockage >
- < Magasin central, *sorte-de*, Unité du stockage >
- < Unité de production, *sorte-de*, Installation >
- < Fournisseur, *sorte-de*, Installation >
- < Distributeur, *sorte-de*, Installation >

< Client, *sorte-de*, Installation >

< Ensemble unité du stockage et de production, *sorte-de*, Installation >

< Usine, *sorte-de*, Ensemble unité du stockage et de production >

< Atelier, *sorte-de*, Ensemble unité du stockage et de production >

Du fait que les définitions traduisent une vision conceptuelle de leur auteur, il s'avère que les objets et valeurs de chaque taxème sont des concepts dont la liste en est la suivante :

- Chaîne Logistique,
- Réseau d'Installations,
- Installations,
- Unité du stockage,
- Entrepôt,
- Magasin central,
- Unité de production,
- Fournisseur,
- Distributeur,
- Client,
- Ensemble unité du stockage et de production,
- Usine,
- Atelier

#### **d. Modélisation sous forme d'Actèmes**

L'analyse consiste à identifier les verbes et les groupes nominaux qui représentent des comportements ou des activités. En général, une activité est effectuée par un Destinateur, au moyen d'instruments (ressources matérielles et humaines), pour modifier l'état du destinataire de l'action. Une fois identifiée, l'activité est formalisée par un 7-uplet (l'actème) :

<Destinateur, Action, Destinataire, Propriétés, Etat1, Etat2, Instruments>

Où le Destinateur dirige l'action, l'Action provoque le changement d'état du Destinataire qui subit l'Action, les Propriétés décrivent la façon dont l'Action est effectuée, l'Etat1 caractérise l'état du Destinataire avant l'exécution de l'action, l'Etat2 caractérise l'état du destinataire après l'exécution de l'action, les Instruments sont les moyens nécessaires à la mise en œuvre de l'Action.

Les quatre paraphrases qui font intervenir la locution « assure la fonction de » traduisent une activité et doivent donc être représentées par un actème. Ainsi, nous avons considéré les trois actèmes suivants : **Approvisionnement**, **Transformation** et **Distribution**.

De la paraphrase : « La Chaîne Logistique assure la fonction d’approvisionnement en matières premières », nous pouvons identifier le Destinateur (Chaîne logistique), l’Action (Approvisionnement) et le Destinataire (matières premières). L’actème introduit également le concept de « matière première » qui va subir l’activité « approvisionnement ». Les autres éléments du 7-uplet ne sont pas définis dans ce texte, en particulier, (i) quelles sont les propriétés de « matière première » qui sont affectées par l’opération d’approvisionnement, (ii) quelles sont les propriétés de l’opération d’approvisionnement et (iii) et quels sont les moyens nécessaires à la réalisation de l’approvisionnement. La Figure 1.7 donne une représentation graphique de l’actème sous forme d’actigramme.

Les trois autres paraphrases relatives aux activités de Transformation et de Distribution, introduisent les concepts de « Composant » et de « Produit Fini ». Nous pouvons formuler, également, les mêmes remarques que précédemment concernant les manques d’information.

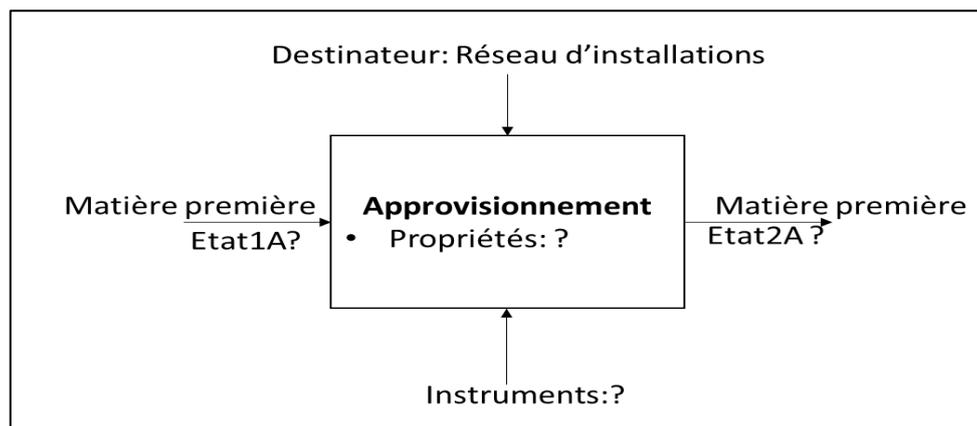


Figure 1-6 : Actème Approvisionnement.

La définition laisse entendre l’existence de deux types de transformations : celle qui transforme la matière première en composant (Transformation 1) et celle qui transforme les composants en produits fini (Transformation 2) d’où la représentation par la Figure 1.8.

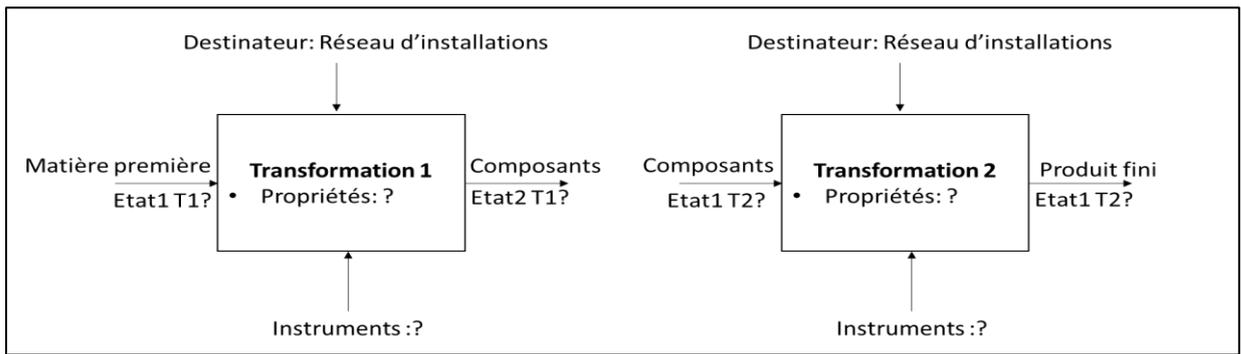


Figure 1-7 : Actème Transformation.

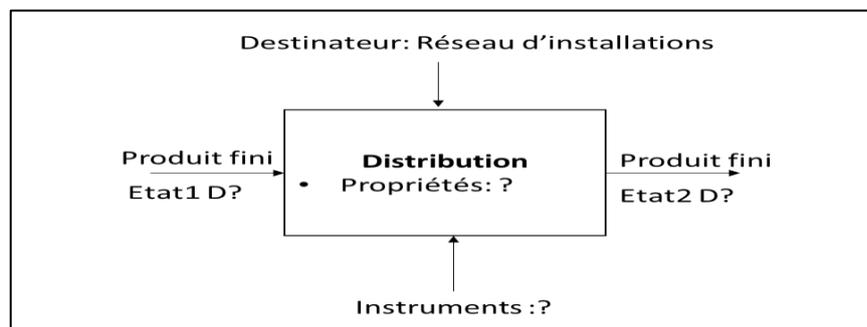


Figure 1-8 : Actème Distribution

Dans chacune de ces activités le destinataire est, d'une façon générique, le réseau d'installations. Dans un cas spécifique, ces activités peuvent avoir des destinataires différents sachant que ces derniers doivent tous faire partie de ce réseau d'installations. A ce stade nous obtenons notre premier modèle pratique.

Les manques d'information qui apparaissent au niveau des actèmes (approvisionnement, transformation1, transformation2 et distribution) concernant les instruments, les état1 et 2 des destinataires ainsi que les propriétés des actions sont spécifiques à un produit particulier et à son niveau de finitude. Les définitions du corpus ayant un caractère générique, ne sont naturellement pas porteuses de ces connaissances spécifiques.

Dans chacune de ces activités le destinataire est, d'une façon générique, le réseau d'installations. Dans un cas spécifique, ces activités pourront avoir des destinataires différents sachant qu'ils appartiendront nécessairement au réseau d'installations.

#### d. Modélisation sous forme d'Inférences

Les définitions qui composent le corpus ne sont pas porteuses de connaissances pouvant être modélisées par des inférences, comme par exemple les différentes stratégies

de gestion du stock ou toutes autres règles de fonctionnement. Nous ne traiterons donc pas des inférences (paradigme Interprétation / Intension).

Toutefois, et à titre d'exemple, les inférences qui peuvent être produites de l'analyse des stratégies de gestion du stocks sont de la forme :

*SI Situation ALORS Action*

Nous pouvons écrire une inférence de la méthode MRP avec la précision de la demande comme suit :

*SI date = date de fin de période ALORS {Prédiction de la demande,*

*Approvisionnement,*

*Production }*

A ce stade, nous obtenons notre premier modèle pratique (Taxèmes plus Actèmes). L'application de cette méthode à l'ensemble des définitions nous amène à l'élaboration du modèle cognitif.

### **1.5.3.5 Elaboration du modèle cognitif**

L'application systématique de la démarche précédemment présentée aux définitions du corpus, a conduit à la production du Modèle Pratique (MP) de chacune d'elle. L'abstraction de ces MPs a permis de construire les taxinomies des Figure 1.10 à 1.16.

Pour la définition générique de la chaîne logistique (Figure 1.10), les auteurs sont partagés en la définissant tantôt comme un réseau d'installations, tantôt comme un réseau d'entreprises. Mais, les parties de l'entreprise qui intéressent ces auteurs sont limitées à celles qui opèrent une transformation sur le produit, soit, les installations. Il n'y a donc pas d'opposition conceptuelle. Pour la suite, nous avons retenu le terme « entreprise » pour établir le lien avec les définitions du point de vue « entreprise ». Nous avons également considéré que <Entreprise, est-composé-de, Installations>, bien que cette relation n'apparaisse pas de façon explicite dans les définitions choisies. La notion de « réseau » repose sur l'échange (la transmission) de matières entre les entreprises.

Le concept « installation » est défini de façon générique par Botta-Genoulaz (2005) et Bouchriha (2007)(paragraphe §1.6.4.4). De notre point de vue, le terme « distributeur » fait plutôt référence à un métier (Figure 1.14 où « distributeur » est une sorte d' « Acteur indépendant ») qu'à une installation, en accord avec La Londe et al. (1994). Un

distributeur possède nécessairement une (ou plusieurs) installation(s) (est-composé-de), mais n'est pas une sorte d'installation. Ganeshan et Harrison (1995), emploient le terme de « Site de distribution » qui est plus en rapport avec l'idée d' « Installation ». Pour être cohérent avec les autres termes de la taxinomie « Installation » nous avons introduit le terme d' « Unité de distribution ». D'autre part, les termes « Fournisseur » et « Client » doivent être considérés comme des rôles joués par les entreprises, suivant leur position dans la chaîne. En effet, une entreprise peut être le client d'une entreprise amont tout en étant le fournisseur d'une entreprise aval. Dans ce sens, ces deux termes doivent être considérés comme des propriétés de l'entreprise. L'entité qui est qualifiée de « Client ultime » ou « Utilisateur final » est celle qui utilise le produit comme instrument ou moyen sans opérer de transformation sur celui-ci. La Figure 1.12 réalise la synthèse de cette discussion. Nous avons considéré les termes « Client ultime », « Client final » et « Utilisateur final » comme des synonymes et nous avons retenu le terme « Client final ». Une entreprise qualifiée de « Client final » n'a pas de client, relativement au produit considéré, puisqu'elle en est utilisatrice.

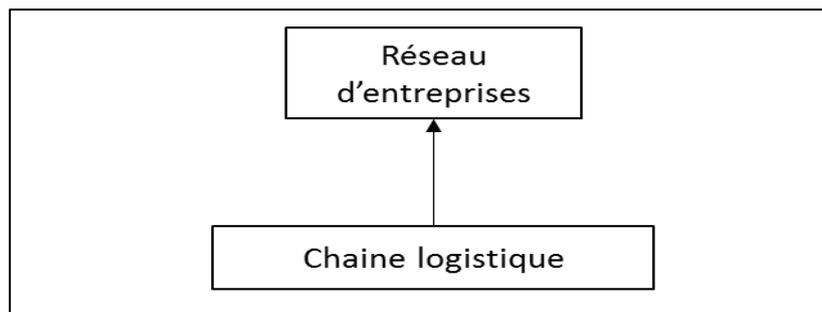


Figure 1-9 : La chaîne logistique est une sorte de Réseau d'entreprises.

La Londe et al. (1994) abordent la définition d'une chaîne logistique par ses composantes (définition partitive). Les termes qui en constituent les parties font tous référence à un métier qui réalise une transformation sur le produit. La transformation pouvant agir sur l'état de finitude du produit ou sur sa localisation spatiale. On remarque également que ces parties constituantes sont des sortes d'Acteurs indépendants (ou entreprises)(Figure 1.14). Ainsi, une chaîne logistique est composée d'entreprises ou d'acteurs indépendants (nous avons considéré ces deux termes comme des synonymes)(Figure 1.11). Du point de vue de la modélisation des actèmes, ces termes que nous avons qualifié de « métier » constituent les destinateurs des actions de transformation correspondante (Figure 1.13). Ils sont plus précis que le terme générique « Réseau d'installations » (Figures 1.7 à 1.9).

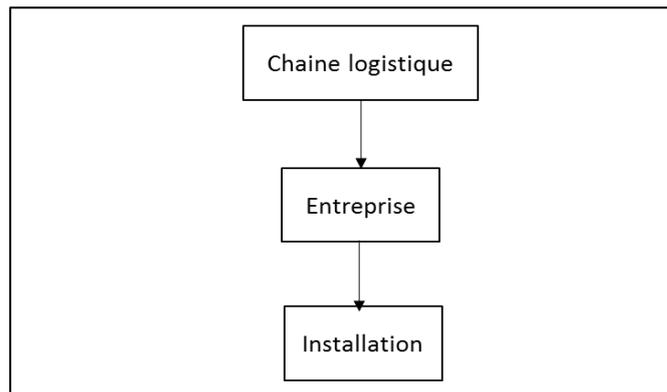


Figure 1-10 : Composants d'une chaîne logistique et composants d'entreprises (relation « Est composé de »).

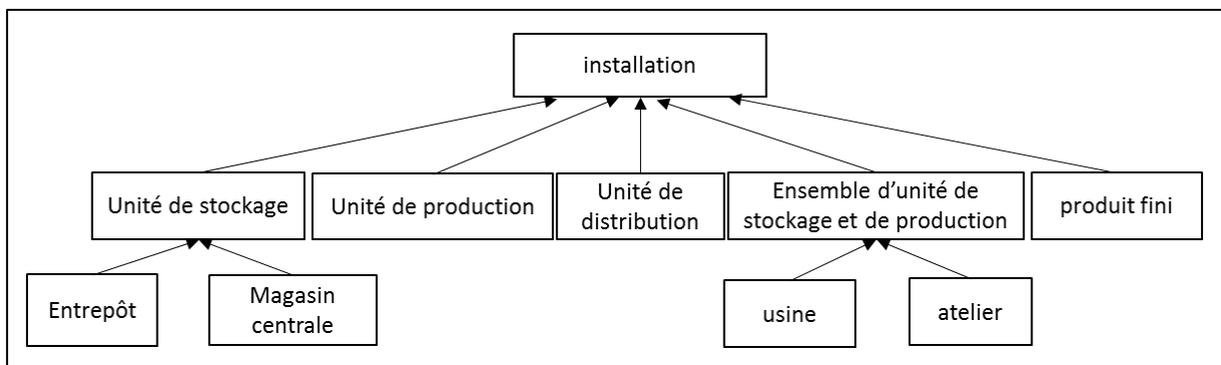


Figure 1-11: Taxinomie installation (relation « Sorte de »).

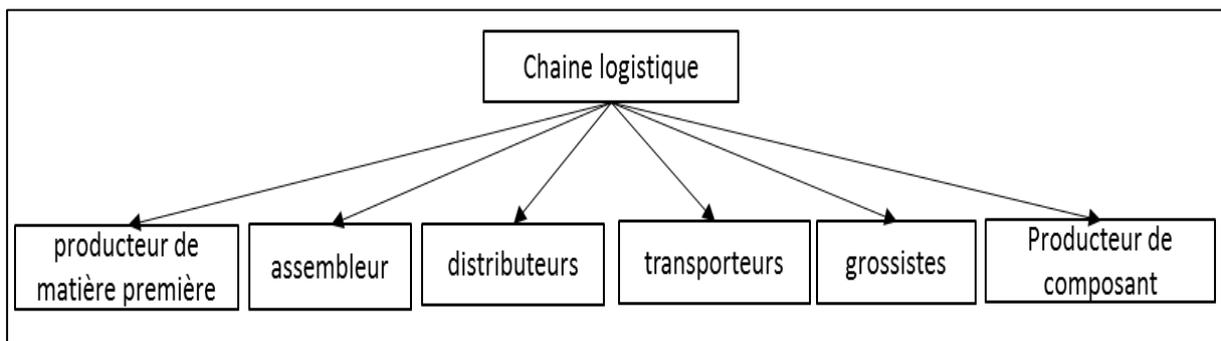


Figure 1-12 : Composants d'une chaîne logistique selon le point de vue produit (relation « Est composé de »).

L'analyse des activités (actèmes) au niveau cognitif a pour but de faire apparaître des actinomies (organisations récurrentes et régulières d'actèmes). Or, notre corpus, ne permet pas la production d'actinomies. Dans ce sens, nous obtenons un ensemble d'actèmes non organisés où tous les éléments du 7-uplet ne sont pas définis. Toutefois, les définitions du corpus nous ont permis d'extraire la taxinomie de ces activités (Figure

1.14). La définition de Lummus et Vokurka (2004) représente un cas particulier dans le sens où elle fait intervenir des activités de gestion du produit. Cette singularité dans les définitions du corpus renforce notre choix d'avoir privilégié le terme « Entreprise » plutôt qu' « Installation » dans la définition générique de la chaîne logistique. Ainsi, les activités des entreprises qui constituent une chaîne logistique se partagent en « Activités de gestion du produit » et en « Activités de traitement du produit ».

Pour le concept « Produit », qui est au cœur de ce point de vue, l'ensemble des termes Matière première, Composant, Produit intermédiaire et Produit fini, sont considérés comme des « Sorte de » Produit (Figure 1.16). Le critère de classification est l'état de finitude du produit.

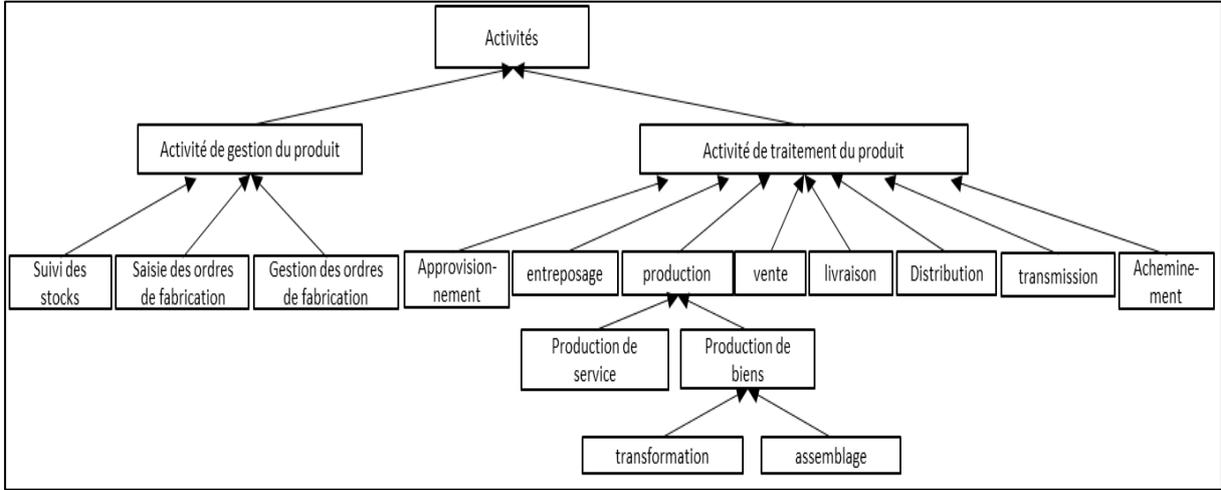


Figure 1-13 : Taxinomie des activités d'une chaîne logistique.

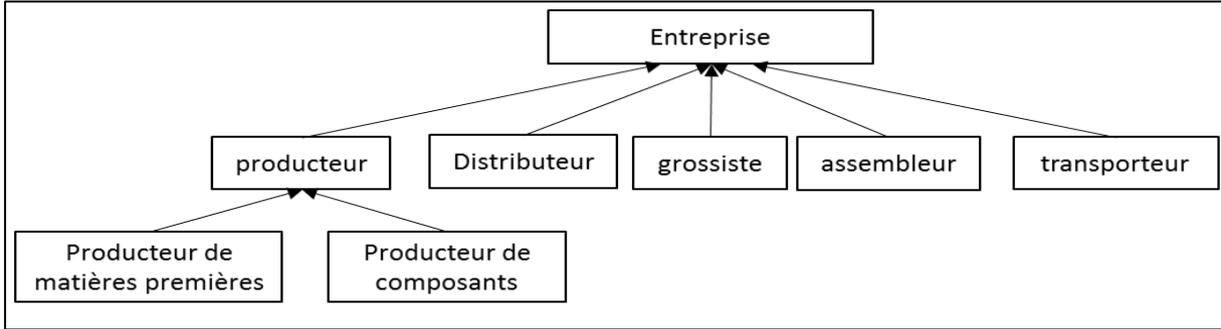


Figure 1-14 : Taxinomie du concept entreprise.

Les définitions sont proches mais n'utilisent pas les mêmes termes (voir tableau 1.3). Par exemple le terme « Produit » désigne tantôt le fruit final d'une chaîne logistique tantôt il désigne les composants ou encore le produit-intermédiaire.

Chaque acteur est distingué selon sa participation (en relation avec son métier) dans la chaîne logistique (producteur, distributeur, assembleur, grossiste, assembleur, transporteur).

Les définitions font référence aux différentes opérations (fonctions, processus, étapes, ou activités), toutefois l'ordre n'est pas précis et certains paramètres des Actèmes sont omis. Ceci suggère que le point de vue produit présente la chaîne logistique comme un système d'entrée/sortie qui reçoit des matières premières par la fonction approvisionnement et les transforme en produits finis. Ces derniers sortent de la chaîne grâce à la fonction distribution. Enfin nous n'avons pas d'éclaircissement sur la façon avec laquelle les matières changent d'état ou transitent à l'intérieur de la chaîne.

Du fait qu'une entreprise peut être décrite par ses activités ou ses installations, certains chercheurs utilisent les activités ou encore les unités d'installations et non pas l'entreprise pour définir la chaîne logistique. Dans ce cas les frontières entre les entreprises sont effacées.

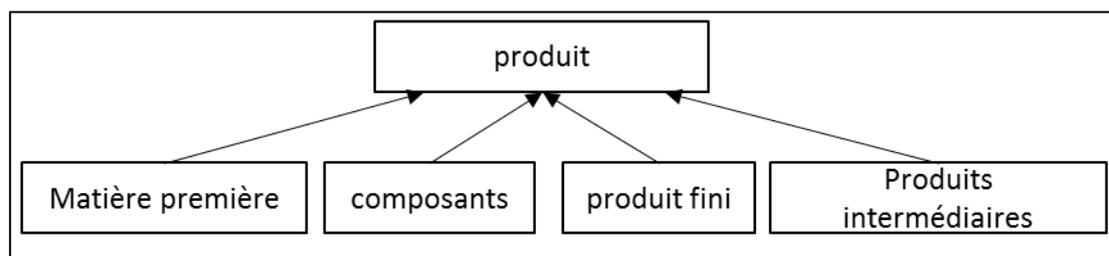


Figure 1-15 : Taxinomie de produit.

### 1.5.3.6 Analyse du corpus selon le point de vue « entreprise »

Au cours de ce paragraphe, nous reprenons la logique de présentation du paragraphe précédent, mais au cas d'une définition ayant adopté le point de vue « entreprise ».

a. Considérons le cas de la définition de Stadler et al., (2000) :

*« Une chaîne logistique est constituée de deux ou plusieurs organisations indépendantes, liées par des flux physiques, informationnels et financiers. Ces organisations peuvent être des entreprises produisant des composants, des produits intermédiaires et des produits finis, des prestataires de service logistique et même le client final lui-même ».*

Avec cette approche, on remarque l'émergence du concept de flux qui n'apparaissait pas avec l'approche « produit ». Cette remarque est également valable dans les cas des définitions de Mentzer et al., (2001) et Tsay et al., (1999). Le concept de Chaîne Logistique

est défini par ses constituants (Organisations et Flux). On retrouve l'idée que le client final peut être une entreprise, qui sera à nouveau précisée par Botta-Genoulaz (2005) et Bouchriha (2007).

### **b. Production des paraphrases**

À partir de ce texte, nous pouvons produire les paraphrases suivantes.

- Une Chaîne Logistique est constituée de deux ou plusieurs organisations indépendantes,
- Les organisations indépendantes sont liées par un flux physique,
- Les organisations indépendantes sont liées par un flux informationnel,
- Les organisations indépendantes sont liées par un flux financier,
- Les organisations indépendantes peuvent être des entreprises,
- Les entreprises peuvent produire des composants,
- Les entreprises peuvent produire des produits intermédiaires,
- Les entreprises peuvent produire des produits finis,
- Les entreprises peuvent être des prestataires de services logistiques
- Les entreprises peuvent être le client final.

### **c. Modélisation sous forme de Taxèmes**

À partir des paraphrases, il est possible de produire les Taxèmes suivants :

- < Chaîne Logistique, *est-composé-de*, Organisations indépendantes >
- < Chaîne Logistique, *Nombre-d-Organisations*,  $\geq 2$  >
- < Chaîne Logistique, *est-composé-de*, Flux Physiques >
- < Chaîne Logistique, *est-composé-de*, Flux Informationnels >
- < Chaîne Logistique, *est-composé-de*, Flux Financiers >
- < Flux Physique, *sorte-de*, Flux >
- < Flux Informationnel, *sorte-de*, Flux >
- < Flux Financier, *sorte-de*, Flux >
- < Organisation Indépendante, , Flux Physique >
- < Organisation Indépendante, , Flux Informationnel >
- < Organisation Indépendante, , Flux Financier >
- < Entreprise, *sorte-de*, Organisation Indépendante >
- < Prestataire de Service Logistique, *sorte-de*, Entreprise >
- < Client Final, *sorte-de*, Entreprise >

Du fait que les définitions traduisent une vision conceptuelle de leurs auteurs, il s'avère que les objets et valeurs de chaque taxème sont des concepts dont la liste en est la suivante:

- Chaîne Logistique,
- Organisation Indépendante,
- Flux,
- Flux Physique,
- Flux Informationnel,
- Flux Financier,
- Entreprise,
- Composants,
- Produits Intermédiaires,
- Produits Finis,
- Prestataire de Service logistique,
- Client Final,

#### **d. Modélisation sous forme d'Actèmes**

Les trois paraphrases qui font intervenir la locution « peuvent produire » traduisent une activité de production et doivent donc être représentées par un actème. Ainsi, nous pouvons considérer l'Actème « Production ».

De la paraphrase : « Les Entreprises peuvent produire des composants », nous pouvons identifier le Destinateur (L'Entreprise), l'Action (Production) et le Destinataire (Composant). Le texte ne précise que le résultat (Etat 2 du Destinataire) de l'action de production. L'Etat 1 du destinataire n'est pas précisé. Les autres éléments du 7-uplet ne sont pas définis, tout comme cela était le cas avec les définitions de l'approche « Produit ».

Des trois auteurs, seul Stadler et al. (2000) fait référence à une opération sur le produit, tout en étant très générique (Production). C'est le seul actème que nous pouvons extraire de ce corpus.

### **1.5.3.7 Élaboration du modèle cognitif**

L'application systématique de la démarche précédemment présentée aux définitions du corpus, a conduit à la production du Modèle Pratique (MP) de chacune d'elle. L'abstraction de ces MPs a permis de construire les taxinomies des Figure 1.18 à 1.20.

Pour la définition générique de la chaîne logistique, les auteurs la définissent tantôt comme un ensemble d'entreprises, tantôt comme un groupe d'entités. Le terme « entité » étant à la fois très générique et très général, nous retiendrons le terme « entreprise » qui

est cohérent avec l'approche produit. De plus, les auteurs parlent de « groupe » ou d'« ensemble » en rajoutant immédiatement la présence d'inter-relations entre les entreprises (« liées par », « impliquées dans les flux »). L'association de ces deux notions répond parfaitement à la définition d'un réseau. Nous pouvons, par conséquent, reprendre la définition générique de l'approche produit (Figure 1.10).

Pour la définition partitive, les trois auteurs définissent la chaîne logistique comme étant composée d'« entreprises » et de « Flux », en considérant le terme « entreprises » synonyme d'« Acteurs indépendants », d'« Organisations indépendantes ». La Figure 1.18 donne la représentation de cette définition. L'approche entreprise complète la définition de l'approche produit par la composante « Flux ».

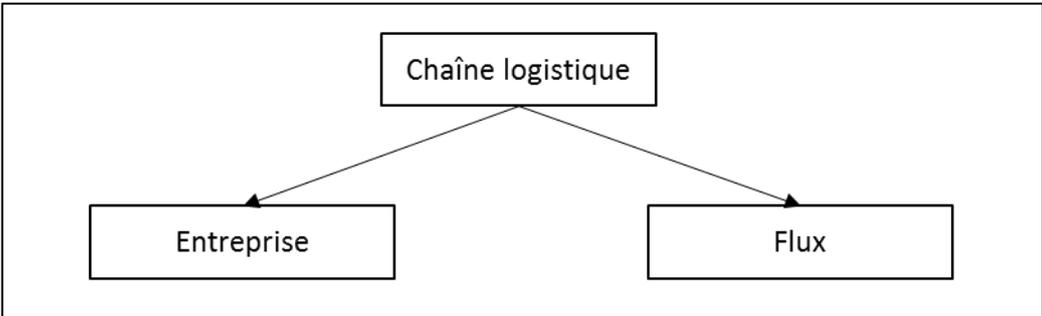


Figure 1-16 : les composantes d'une chaîne logistique selon le point de vue entreprise (relation « Est-composé-de »).

Les trois auteurs sont unanimes dans la définition du concept de flux. Ils sont de trois types (informationnel, financier et de produit) et sont présents systématiquement. Alors que l'approche produit limite les inter-relations au seul flux de produit, l'approche entreprise les élargissent aux flux financiers et informationnels. Ici aussi, l'approche entreprise complète l'approche produit. Elle étend également le concept de « flux de produits » à celui de flux de services. D'où les taxinomies des Figures 1.19 et 1.20.

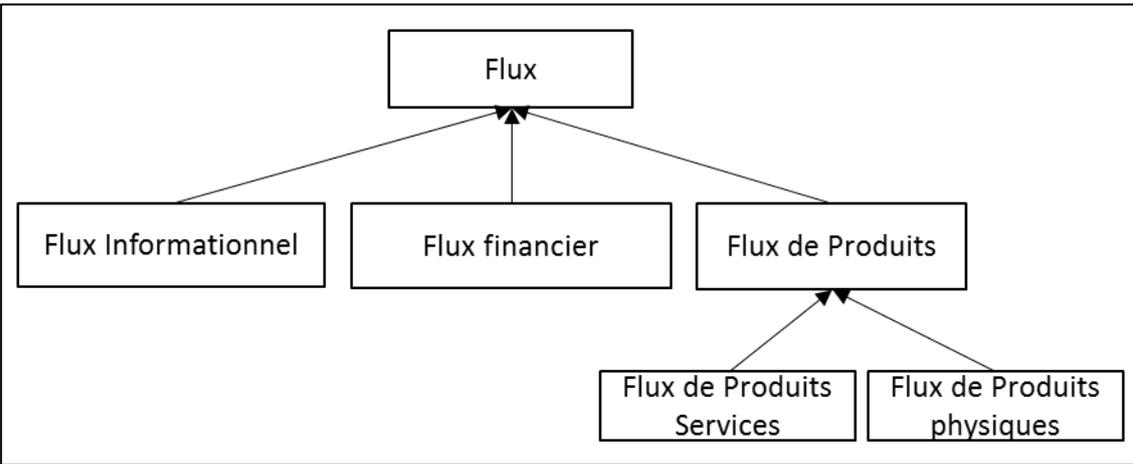


Figure 1-17 : Taxinomie des flux (relation « Sorte-de »).

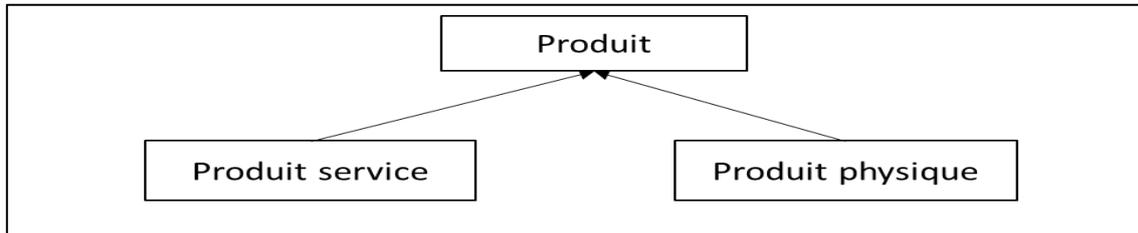


Figure 1-18 : Taxinomie de produit (relation « Sorte-de »).

On peut remarquer que la taxinomie « Produit » de la Figure 1.16 précise le concept « Produit physique ». En considérant ces deux termes comme synonymes, les définitions de l'approche produits rajoutent une couche de concepts plus spécifiques qui viennent préciser le concept de « produits physiques ». Les trois concepts « composants », « produits intermédiaires » et « Produits finis », apportés par la définition de Stadler et al. (2000), sont déjà présents et définis par l'approche produit (Figure 1.16).

Stadler et al. (2000) introduisent le concept « Prestataire de service logistique » qui est significatif d'une nouvelle sorte de métier et va naturellement prendre sa place au niveau de la taxinomie des entreprises (Figure 1.15).

Mentzer et al. (2001) introduisent la notion de « Flux amont » et de « Flux aval ». Les qualificatifs « amont » et « aval » sont relatifs à l'entreprise considérée et peuvent être appréhendés comme une propriété du flux. Ils introduisent également le concept « Source » comme représentant le début de la chaîne logistique. Suivant notre analyse, une « Source » est une entreprise de la chaîne pour laquelle on considère qu'elle n'a pas de fournisseur. Ainsi, la « Source » d'une chaîne logistique n'a pas de fournisseur et le « Client ultime » n'a pas de client.

### **Synthèse et discussion**

Les deux approches (entreprise et produit) n'introduisent pas de contradiction conceptuelle, mais au contraire, elle sont complémentaires. L'approche entreprise élargie la portée des concepts alors que l'approche produit les précise.

L'approche entreprise introduit le concept de flux, pouvant être de type financier, informationnel, de produit service ou de produit physique. « Ils constituent les objets qu'il convient de gérer dans le cadre des chaînes logistiques » (Lauras, 2004). L'approche produit précise le concept de produit physique et développe les activités de gestion et de traitement du produit.

D'un point de vue définitoire, une chaîne logistique est considérée comme un réseau d'entreprises constitué d'un ensemble d'entreprises et de Flux. Les flux établissent des relations de type clients/fournisseurs qui se définissent relativement à chaque entreprise. Les notions de client et de fournisseur sont des propriétés qui caractérisent chaque entreprise de la chaîne. Une entreprise pour laquelle on ne définit pas de fournisseur est une source de la chaîne et une entreprise pour laquelle il n'y a pas de client (relativement au produit considéré) est un client final.

Une chaîne logistique peut être limitée à un client et un fournisseur (la source et le client final), comme elle peut être étendue du fait qu'on peut toujours considérer les fournisseurs des fournisseurs et les clients des clients.

## **1.6 Conclusion**

Ce premier chapitre est consacré à la compréhension du domaine des chaînes logistiques. Dans un premier temps, nous avons étudié l'essentiel sur la chaîne logistiques, sa gestion ainsi que les différents modèles qui existent dans la littérature et qui sont principalement utilisés pour étudier ses performances.

Nous avons effectué ensuite une analyse ontologique des différentes définitions concernant la chaîne logistique. Les objectifs de cette étude est de rapporter une clarification à ce domaine, et d'en tirer ses caractéristiques afin d'entamer l'étude de ses risques. L'analyse ontologique a été appliquée d'abord sur les définitions du point de vue « produit » puis sur les définitions de point de vue « entreprise » pour obtenir un modèle cognitif relatif à chaque point de vue. Une synthèse a été présentée à l'issue de chaque modèle. Cette analyse ontologique montre que les définitions du corpus sont plutôt complémentaires.



# Chapitre 2. Etude des risques dans les chaînes logistiques

## 2.1 Introduction

L'intérêt qu'accordent les entreprises aux chaînes logistiques se justifie par la recherche perpétuelle de l'amélioration de leurs performances. En revanche, la complexité de ces systèmes, en termes d'hétérogénéité et de nombre d'intervenants, augmente leurs vulnérabilités face aux différents événements indésirables qui engendrent par conséquent des perturbations, voire des interruptions, au sein des chaînes. A cela s'ajoute les nouvelles tendances de gestion telles que, l'externalisation, la sous-traitance, les productions allégées (Lean SC), le « Just In Time » (JIT), etc (Juttner et al., 2003). Finch (2004) montre que tout en devenant membre d'une chaîne logistique, les PME augmentent considérablement leur exposition au risque.

Les exemples d'évènements affectant les chaînes logistiques dans la dernière décennie sont nombreux et de sources diverses. Nous pouvons citer comme exemples les attentats du 11 septembre 2001, l'ouragan de Katrina 2005, le tremblement de terre de Kobe en 1994, etc.

Un évènement indésirable ou un accident touchant un élément d'une chaîne logistique peut avoir des répercussions sur les autres maillons et par conséquent sur la chaîne entière (Chopra et Sodhi, 2004). L'étude des risques dans les chaînes logistiques devient désormais indispensable.

Dans ce chapitre, nous nous pencherons donc sur l'étude de la notion de *risque* et de *vulnérabilité* dans les chaînes logistiques, afin de présenter un modèle permettant de les évaluer.

Au cours de la première partie de ce chapitre, nous introduisons la notion de risque d'une façon générale, les différents concepts qui la définissent ainsi que sa gestion.

La deuxième partie du chapitre est composée de cinq sections. Dans la première et la deuxième section, nous présentons les définitions concernant le risque dans le domaine des chaînes logistiques (SCR) ainsi que son management (SCRM : « Supply Chain Risk Management »). Dans la troisième section nous présentons les différents risques

identifiés au sein des chaînes logistiques ainsi que les différentes classifications proposées dans la littérature.

Les études sur les risques dans les chaînes logistiques sont souvent liées à d'autres concepts à savoir l'incertitude, la vulnérabilité et la résilience. Nous proposons dans les sections 2.4 et 2.5 d'explicitier le lien entre ces concepts afin de comprendre les différentes approches utilisées pour aborder ce sujet.

Dans la troisième partie du chapitre, nous présentons un état de l'art sur les différentes méthodes de modélisation des chaînes logistiques qui prennent en compte le concept de risque. Cet état de l'art nous permettra de situer notre travail de recherche et de justifier, à la fin, notre positionnement de recherche.

## **2.2 Le concept de risque**

Selon Villain-Gandossi (1990), le terme « risque » a émergé dans le domaine maritime en Europe occidentale au XII<sup>ème</sup> siècle (Mercantini et al., 2015). L'origine du terme a été largement discutée. Certains chercheurs considèrent que ce terme est d'origine latine du verbe « *resicare* » signifiant « couper » et qui est relatif à l'image du défi posé à un marin par une barrière de récifs et la possibilité d'y venir « découper » la coque de son navire.

Une deuxième origine possible viendrait de la langue Romane et du mot « *rixicare* » signifiant « se quereller » où on retrouve la notion du danger avec l'incertitude de l'issue de la querelle.

D'autres chercheurs pensent que le terme pourrait être d'origine Arabe, venant du mot « *rizq* » qui signifie « Don de Dieu » (Norman et Lindroth, 2004). Selon cette acception, le risque peut avoir des effets positifs ou négatifs. Il peut alors être perçu positivement comme un facteur d'opportunité, ou négativement sous la forme d'un danger à éviter. Dans la littérature on s'intéresse souvent aux conséquences négatives des risques.

### **2.2.1 La notion de risque**

Le risque est une notion complexe. Cette complexité peut être expliquée par le fait qu'il s'agit d'une construction sociale fondée sur la dimension culturelle de la société et des individus (Hennet et Mercantini, 2010). Il existe trois courants de pensée permettant d'appréhender le risque : les courants réaliste, représentationnel et hybride.

Selon le courant de pensée positiviste, le risque est considéré comme une catégorie ontologique ; il a sa propre existence (Rescher, 1983). Le risque est indépendant et

externe au sujet percevant. Il apparaît comme une propriété de la nature, de la technologie, d'une substance ou d'une activité dangereuse. Il est appréhendé suivant une démarche scientifique désincarnée, faisant fi de ses processus sociaux et culturels (Pieret, 2012). Le risque est un phénomène qui existe en tant que tel, il fait partie du monde externe, indépendamment du sujet qui y est confronté. Le risque se définit ainsi comme la conjonction de deux éléments objectifs du monde extérieur : la possibilité de réalisation d'un événement et ses conséquences négatives (Kermisch, 2011).

Selon le courant de pensée représentationnel, le risque n'est pas une réalité extérieure puisqu'il n'existe pas indépendamment des procédures qui l'objectivent (Caeymaex, 2007). Le risque n'existe pas en soi. Ses représentations ne sont que le résultat de la compréhension humaine et non un reflet exact de la réalité (Pieret, 2012). Le risque est seulement une façon de percevoir et d'interpréter des phénomènes particuliers sans qu'il y ait nécessairement de relations entre eux. Le risque est une construction sociale, indissociable de contingences politiques et culturelles qui fondent son émergence, et qui seuls sont dignes d'analyses (Pieret, 2012).

Selon le courant de pensée hybride, les théories sur le risque visent à articuler à la fois les pensées réalistes et représentationnelles. Le risque est fondé sur la réalité, mais elle est multiple et non déterminée. Cette réalité n'est rendue visible qu'au travers de la perception du risque qui, elle, est une construction sociale et donc évolutive (Pieret, 2012). Dans son livre "World at Risk", Ulrich Beck (2009) affirme que « la réalité du risque est perçue de par sa nature controversée. Les risques n'ont pas d'existence abstraite en soi. Ils acquièrent une réalité dans les jugements contradictoires des groupes et des populations ».

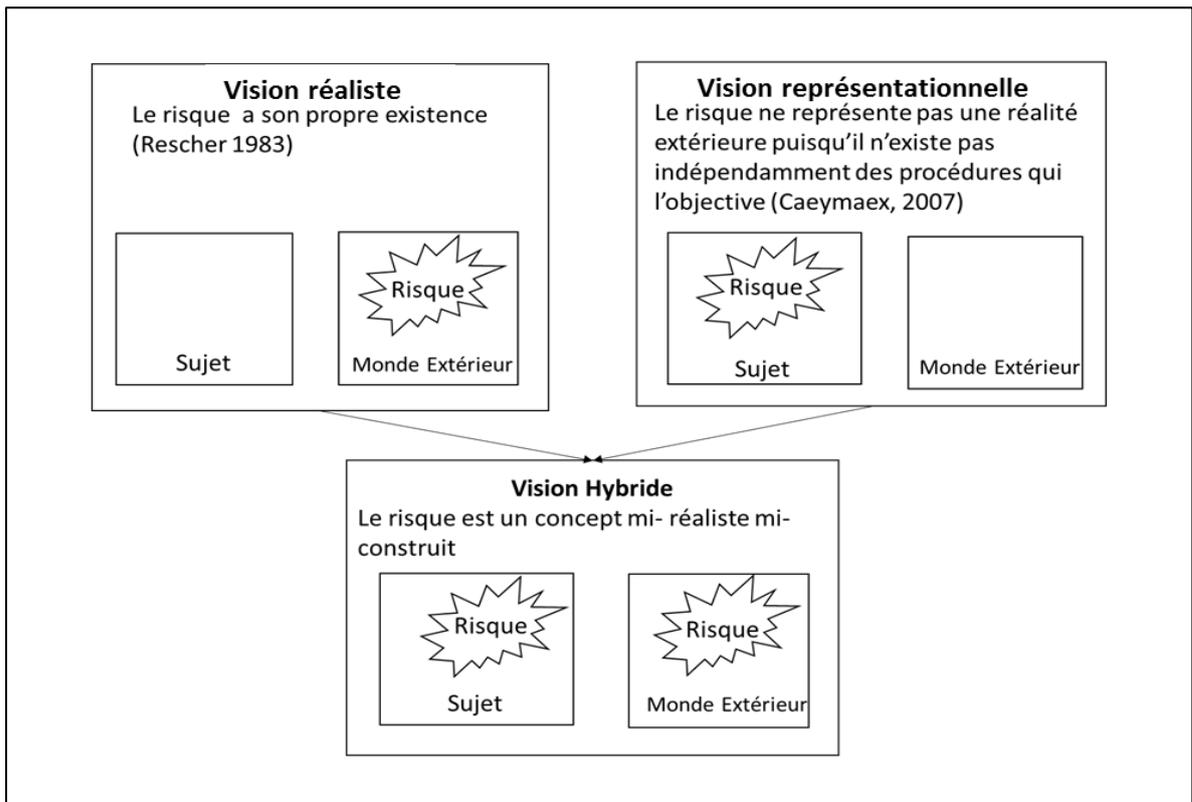


Figure 2-1 : Représentation schématisée des différents courants de pensée (positiviste, constructiviste et hybride) d'après (Kermisch, 2011).

La notion de « risque réel » se rattache au courant de pensée réaliste (Starr, 1976). Les notions de « risque objectif » ou « risque quantifié » et de « risque subjectif » ou « perception du risque » se rattachent au courant de pensée représentationnel.

La notion de « risque objectif » traduit l'idée que le risque est la mesure d'un potentiel de dommage. Le potentiel de dommage appartient au monde extérieur, le risque, qui en est sa mesure, est une représentation du sujet qui analyse.

La notion de « risque subjectif » traduit l'idée d'une élaboration individuelle du risque. Il se conçoit comme un artéfact à l'image des peurs individuelles sans qu'il soit nécessairement le reflet du monde extérieur.

Fischhoff et al. (1984) distinguent ces deux formes de constructions (objectif/quantifié et subjectif/perception). Ils indiquent que la première fait référence au domaine de l'expertise technique et « renvoie aux produits de la recherche scientifique, principalement les statistiques de la santé publique, les études expérimentales, les enquêtes épidémiologiques et les analyses probabiliste des risques ». La seconde notion se réfère à la perception du risque par les profanes. Cette opposition de point de vue, entre

les experts et les profanes, est à l'origine de la perte de confiance profonde des sociétés modernes vis à vis du développement des nouvelles technologies. Ce mouvement est apparu au cours des années 1960 aux États Unis connu sous le nom de mouvement environnementaliste; il est contemporain de ce qu'on considère être la deuxième révolution industrielle.

## 2.2.2 Définitions de risque

Le sujet du risque a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches menés dans différentes disciplines tels que les sciences sociales, les sciences du comportement, les sciences naturelles, les sciences de l'ingénieur, etc.

La première définition scientifique du risque date de 1657 avec les travaux de Huygens qui le définit comme « l'espérance mathématique d'une fonction de probabilité d'événements ». Bernouilli (1738) confirme cette définition dans le domaine économique, dans sa publication « Specimen theoriae novae de mensura sortis » (« Éléments d'une nouvelle théorie sur la mesure du hasard »). D'une façon générale, le risque est défini, aujourd'hui, comme une combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences (ISO/CEI73). D'un point de vue calculatoire, la définition de Huygens et Bernouilli est toujours utilisée pour l'évaluation quantitative des risques technologiques.

Dans le domaine des risques technologiques, la circulaire ministérielle n° DPPR/SEI2/MM-05-0316 reprend la définition de l'ISO/CEI73 en précisant le terme « conséquence » de sorte que le risque est désormais défini comme une combinaison de la probabilité d'un événement, de l'intensité des effets du phénomène dangereux induit par l'événement et de la vulnérabilité des enjeux considérés (Risque = Probabilité X Intensité X Vulnérabilité). Cette définition présente l'avantage de faire apparaître de façon explicite la vulnérabilité des enjeux (les parties du système considéré qui doivent être préservées). Une analyse linguistique, de même type que celle présentée au cours du chapitre précédent, nous a conduit à une représentation des définitions de cette circulaire sous la forme d'un réseau sémantique. La Figure 2-2 ci-après est un extrait de ce réseau sémantique, d'après (Mercantini, 2008).

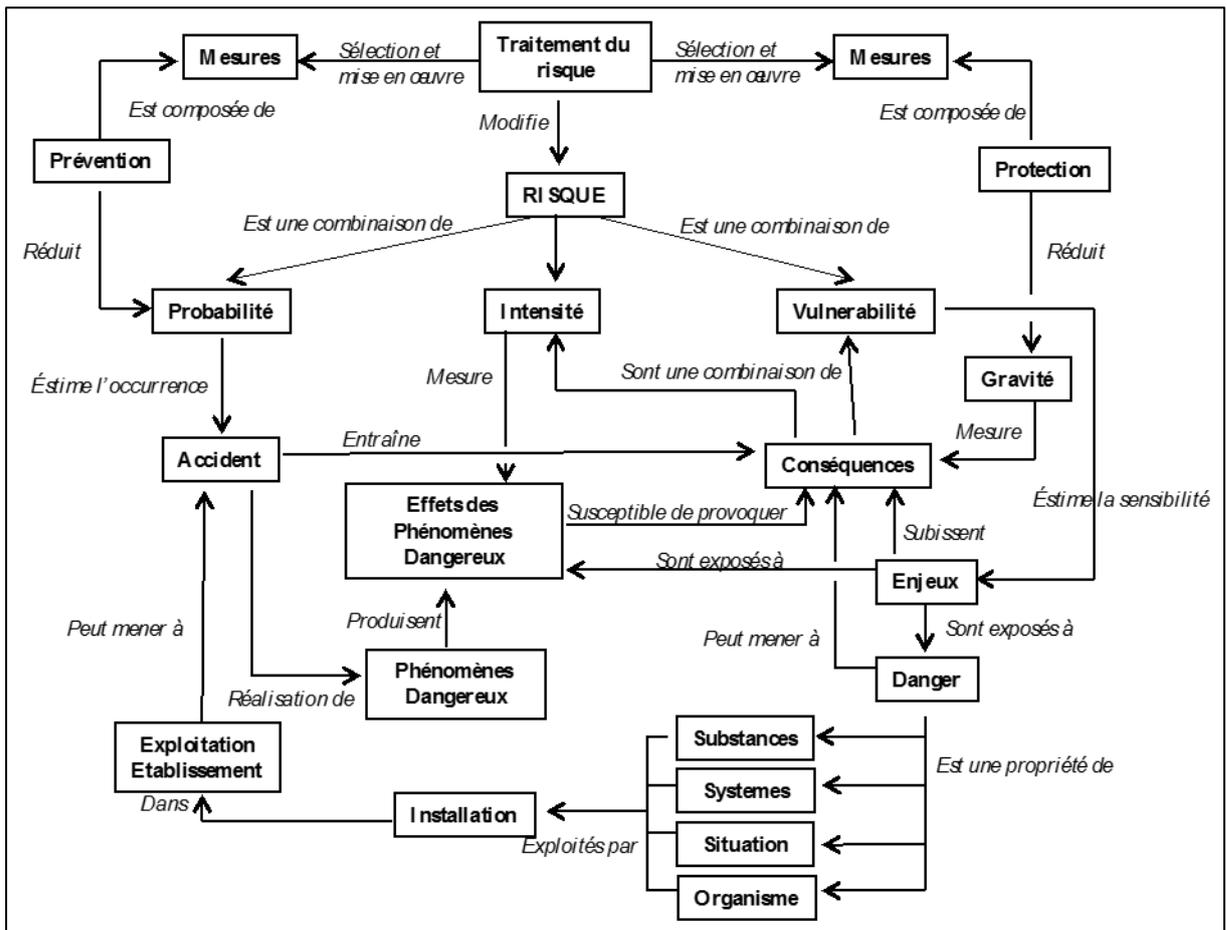


Figure 2-2 : Réseau sémantique impliquant les principaux concepts définis par la circulaire ministérielle n° DPPR/SE12/MM-05-0316 (extrait).

À titre indicatif, nous rappelons quelques définitions de la circulaire sur la base desquelles le réseau sémantique a été construit :

- **Conséquences ou Dommages.** Combinaison, pour un accident donné, de l'intensité des effets et de la vulnérabilité des cibles (enjeux) situées dans les zones exposées à ces effets. Ils s'expriment en définissant la nature et la gravité des atteintes portées à ceux-ci.
- **Accident.** Événement non désiré résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation d'un établissement qui entraîne des conséquences/dommages vis-à-vis des personnes, des biens ou de l'environnement et de l'entreprise en général. C'est la réalisation d'un phénomène dangereux combiné à la présence de cibles vulnérables exposées aux effets de ces phénomènes.
- **Phénomène dangereux.** Libération d'énergie ou de substance produisant des effets, susceptible d'infliger un dommage à des cibles (ou éléments vulnérables)

vivantes ou matérielles, sans préjuger l'existence de ces dernières (ISO/IEC 51).

- **Vulnérabilité (ou sensibilité).** Se dit d'une cible à un effet. C'est le facteur de proportionnalité entre les effets auxquels est exposé un élément vulnérable (ou cible) et les dommages qu'il subit.
- **Intensité.** Mesure physique de l'intensité du phénomène (thermique, toxique, surpression, projection).

La norme ISO/FDIS 31000 (2009) sur le management du risque définit le risque comme l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs. L'effet est un écart (positif et/ou négatif) par rapport aux objectifs initiaux. Les objectifs peuvent concerner différents aspects (financiers, sécurité, environnementaux) et différents niveaux (stratégique, tactique, ou opérationnel). L'effet pourra être évalué sous forme d'un gain ou d'une perte. Dans la littérature on s'intéresse plutôt à étudier les pertes. Cette définition se rapproche de celle de Gourc (2006) qui définit le risque d'un projet comme « la possibilité que survienne un événement dont l'occurrence entraînerait des conséquences (positives ou négatives) sur le déroulement de l'activité du projet ».

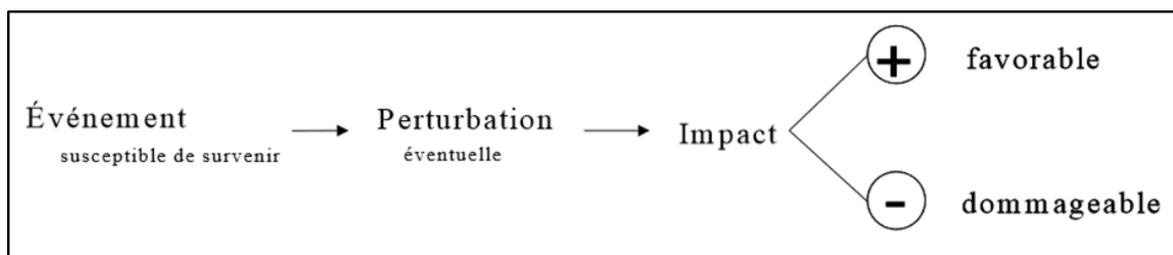


Figure 2-3 : Modèle général du risque, (Gourc, 2006).

### 2.2.3 Le management du risque

D'après la norme ISO/FDIS 31000 (2009), le management du risque est l'ensemble des « activités coordonnées dans le but de diriger et piloter un organisme vis-à-vis du risque ». Le processus de management des risques consiste à réaliser :

- **L'établissement du contexte**, qui consiste à définir l'ensemble des paramètres (internes et externes au système) à prendre en compte, de définir le domaine d'application ainsi que des critères de risque pour la politique de management du risque.

- **L'identification des risques**, qui consiste à décrire les sources de risques, les événements potentiels, leurs causes ainsi que leurs conséquences possibles en faisant appel à des données historiques, des analyses théoriques, des avis d'experts et autres personnes compétentes.

• **L'analyse des risques**, qui consiste à comprendre la nature des risques ainsi que leur niveau (qualitatif ou quantitatif). Pour cela, les méthodes classiques d'analyses sont les arbres de défaillances et de conséquences, l'APR (Analyse Préliminaire des Risques), l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), etc.

• **L'évaluation des risques**, qui consiste à comparer les résultats de l'analyse des risques avec les critères de risque afin de déterminer si les risques sont acceptables ou pas.

• **Le traitement des risques**, qui consiste à modifier les risques (éviter les risques, supprimer les sources de risque, modifier les vraisemblances des événements, modifier les conséquences, partager les risque avec d'autre parties prenantes, accepter le risque). Ainsi, les mesures de traitement du risque se classent en trois grandes catégories :

- les mesures de prévention qui visent à réduire la probabilité d'occurrence de l'accident (voir Figure 2.2),
- les mesures de protection qui visent à réduire la gravité des conséquences des accidents (voir Figure 2.2),
- les mesures assurancielles qui visent à reporter sur un tiers une partie des conséquences financières des accidents.

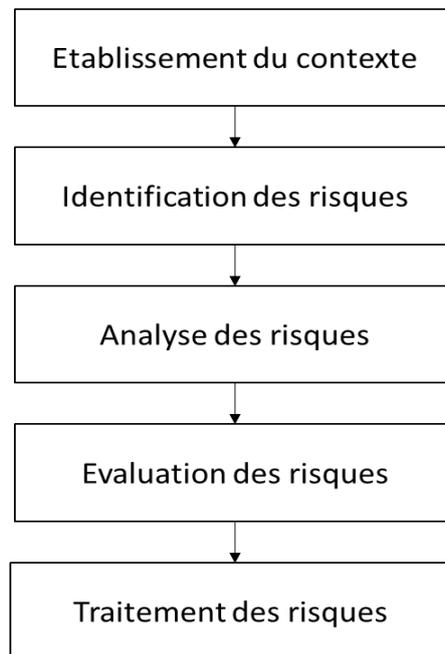


Figure 2-4 : Différentes étapes de gestion de risque.

## 2.2.4 L'analyse des risques

L'analyse des risques se présente comme une démarche qui se construit sur la base d'un ensemble (théoriquement exhaustif) de scénarii d'accidents possibles. Chacun des scénarios faisant l'objet d'une analyse probabiliste (liée à l'évaluation de la vraisemblance d'occurrence) combinée à une analyse déterministe (liée à l'évaluation de la gravité des conséquences). Le point de départ de l'analyse déterministe est la considération que chaque scénario se réalise.

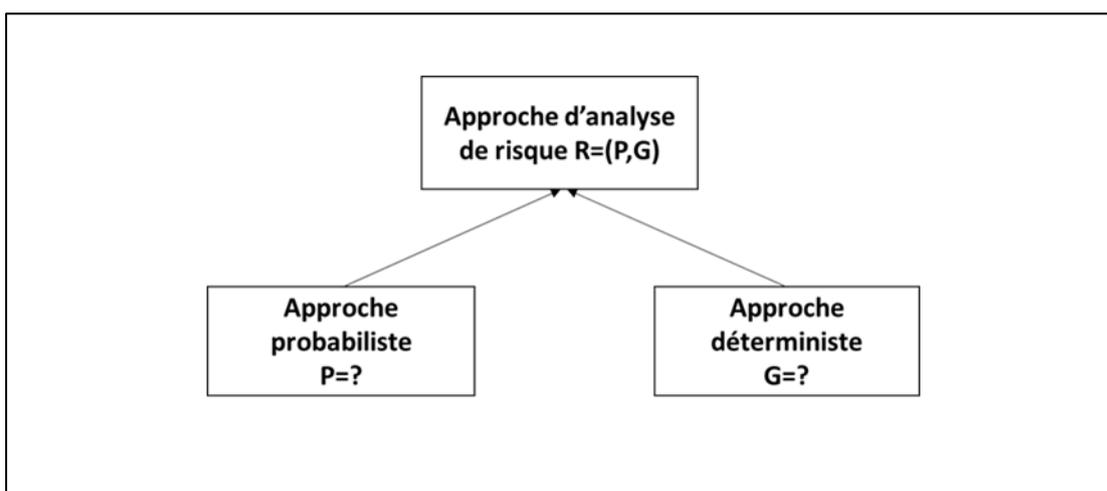


Figure 2-5 : Les deux approches de l'analyse des risques.

### 2.2.4.1 L'approche probabiliste

Cette approche met l'accent sur l'estimation de la probabilité relative à la survenance d'un accident. On distingue les approches qui cherchent la probabilité d'occurrence d'évènements indésirables et les approches qui évaluent les probabilités des scénarios de risques (VAR<sup>3</sup>, CVAR<sup>4</sup>).

En supposant que l'évènement suit une loi de probabilité, il s'agit de calculer les probabilités d'occurrence des différents accidents identifiés. Le système est maîtrisable

---

<sup>3</sup> Value at Risk

<sup>4</sup> Constrained Value at Risk

tant que les probabilités déterminées sont considérée comme acceptables.

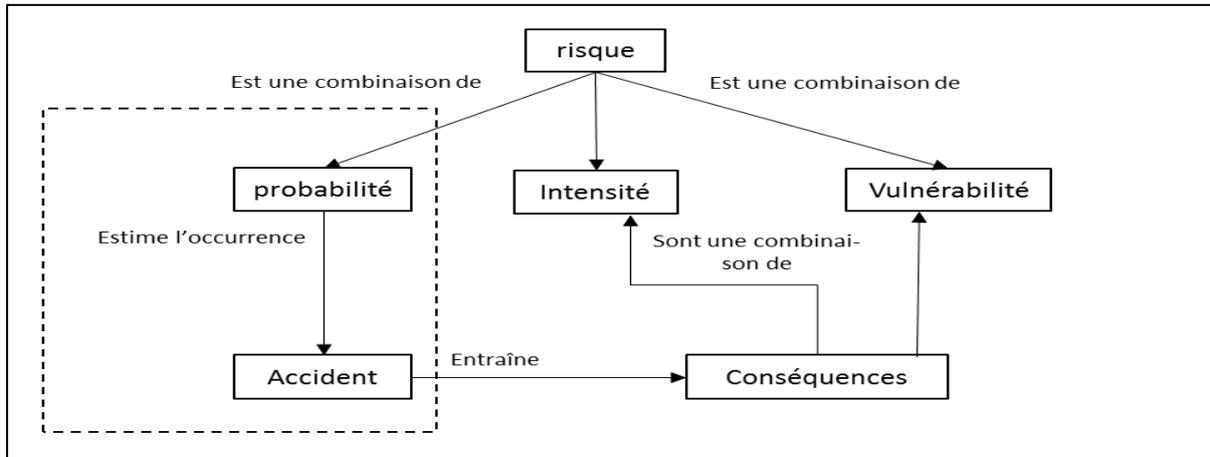


Figure 2-6 : Évaluation du risque selon l'approche probabiliste.

### 2.2.4.2 L'approche déterministe

Cette approche se focalise sur la modélisation de l'enchaînement des phénomènes dangereux (physico-chimiques, biologiques, etc.) qui font suite à l'accident considéré. Il s'agit d'obtenir les relations de cause à effet qui permettent d'estimer les conséquences des scénarii d'accident.

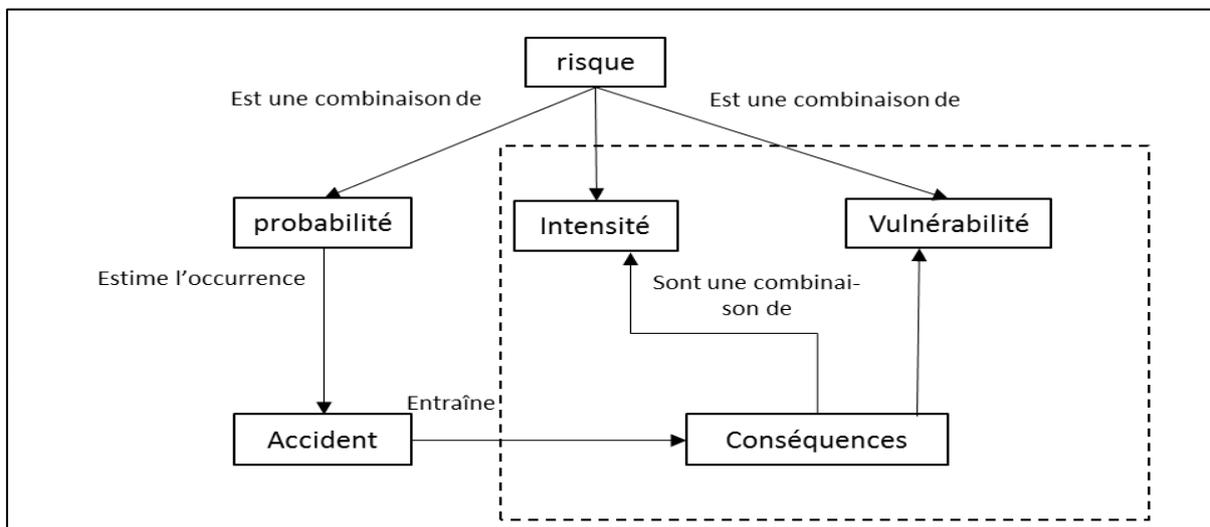


Figure 2-7 : Évaluation du risques selon l'approche déterministe.

## 2.3 Etude des risques dans le domaine des chaînes logistiques

### 2.3.1 Définitions du risque dans les chaînes logistiques

Les chaînes logistiques sont devenues plus complexes et par conséquent plus vulnérables aux différentes perturbations auxquelles elles sont confrontées (Chopra et Sodhi, 2004). L'étude du risque dans les chaînes logistiques n'est pas nouvelle et a été abordée par plusieurs domaines de recherches. Zsidisin (2003) indique que le terme « risque » peut être une source de confusion du fait qu'il est perçu comme un concept multidimensionnel. Jüttner et al. (2003) expliquent que ce terme est utilisé, d'une part pour désigner les incertitudes internes ou externes, qui réduisent les résultats prévisibles, dans ce sens le « Risque » fait référence à une source de risque et d'incertitude, tels que « les risques politiques », « les risques de marché » et « la volatilité de la demande des clients ». Selon la même source, le terme est utilisé pour désigner les conséquences de ces événements. Selon Chopra et Sodhi (2004) il n'existe pas de consensus sur la définition des risques dans les chaînes logistiques (« Supply chain risk » en anglais), ni sur la définition de la gestion des risques dans les chaînes logistiques (« supply chain risk management » en anglais). Tout comme pour la chaîne logistique et le risque, le risque dans les chaînes logistiques a donné lieu à plusieurs définitions selon le domaine d'étude dont elles sont issues et le courant qui les constituent.

Manuj et Mentzer (2008) présentent une classification des différentes définitions du risque selon sa dimension contextuelle. Selon Norrman et Lindroth (2004), la dimension contextuelle du risque est d'ordre financier, stratégique, opérationnel, commercial, et technique. Le tableau suivant résume quelques définitions qui sont principalement inspirés de (Manuj et Mentzer, 2008).

Domaine contextuel	Définition du risque
Finance	« Probabilité des résultats attendus, variabilité des rendements sur un portefeuille de placements, non-remboursement, faillite et/ou ruine » (Beaver, 1966) « the potential Occurrence of an incident or failure to seize opportunities with inbound supply in which outcomes result in a financial loss for the firm » (Zsidisin, 2003)
Stratégique	« Ecart entre les prévisions et la réalisation des résultats » (Bettis, 1981)
Marketing	« Le risque concerne la nature et l'importance des objectifs d'achats et l'échec (psychologiques ou de performance) de la réalisation des objectifs » (Cox, 1967).

Management & psychologie	« portant sur les préférences de gestion explore le lien entre disposition individu à risque, les probabilités des résultats, et les valeurs des résultats attendus » (Manuj et Mentzer 2008).
Théorie classique de la décision	« risk is stated to involve fluctuations around the expected value, covering both negative and positive outcomes » (Wagner et Bode 2006).
Industriel	Le risque est défini comme un développement ou un événement futur qui pourrait affecter la réalisation des objectifs de l'entreprise. (Kajüter 2003)

Tableau 4 : Définitions du risque dans les chaînes logistiques.

Dans la majorité des études sur les chaînes logistiques, a savoir (Jüttner et al., 2003; Harland et al., 2003 ; Peck, 2006 ; Manuj et Mentzer, 2008 ), on se réfère aux définitions proposés par (Lowrance, 1980), (Kaplan et Garrick, 1981), (March et Shapira, 1987) et (Mitchell, 1995). Selon Lowrance (1980), le risque est une mesure de la probabilité et de la gravité des effets indésirables. Pour donner une définition quantitative, Kaplan et Garrick (1981) représentent le risque à l'aide du triplet (scénario, probabilité, conséquences). March et Shapira (1987) définissent le risque comme « the variation in the distribution of possible supply chain outcomes, their likelihood, and their subjective values ». Selon Lavastre O. et Splanzani A. (2010), il s'agit d'une première définition du risque dans le domaine du supply chain management.

Dans le même ordre d'idée, Mitchell (1995) présente le risque sous forme d'une combinaison des différentes pertes possibles et l'importance de ces pertes :

$$\text{Risk} = P(\text{Loss}) \times I(\text{Loss}).$$

Manuj et Mentzer (2008) proposent de rajouter à cette définition des pertes qualitatives tels que l'image de marque ou la perte d'un partenaire. Lahmar et al. (2015) indiquent que 67% d'articles scientifiques concernant l'étude des risques dans les chaînes logistiques utilisent la formule suivante :

$$\text{Risque} = \text{Probabilité} * \text{Impact}.$$

Ces différentes définitions retiennent l'occurrence et les impacts pour caractériser le risque. Nous retrouvons les sens de la définition de la norme ISO/ICE73 précédemment détaillée .

Du fait qu'il est difficile de déterminer la probabilité des événements indésirables, certains chercheurs proposent de revoir la façon de calculer le risque en fonction des probabilités (Christopher et Sodhi, 2004 ; Ghadge et al., 2012). Dans ce contexte, et pour cette raison, Wagner et Bode (2006) définissent le risque dans les chaînes logistiques

comme étant « the negative deviation from the expected value of a certain performance measure, resulting in negatives consequences for the focal firm ».

Les risques peuvent être attribués à des perturbations qui affectent les flux d'information, de matière ou de produits qui traversent les frontières d'une organisation (Pfohl et al., 2010 ; Jüttner et al., 2003 ; La Londe, 1997).

Selon Jüttner et al. (2003) l'étude du risque nécessite de différencier les sources des risques (internes ou externes), les conséquences des risques (financier, réputation, santé et sécurité), les pratiques conduisant aux risques (mettre l'accent sur l'efficacité plutôt que sur l'efficacité, la mondialisation, la réduction du nombre des usines chez qui on sous-traite ou de chez qui on s'approvisionne, la centralisation de la distribution, la tendance croissante vers l'externalisation et la sous-traitance, la réduction du nombre des fournisseurs), et les stratégies de mitigation des risques.

### **2.3.2 Le management des risques dans les chaînes logistiques**

Le SCRM est une discipline en croissance exponentiel (Singhal P. et al 2011). L'exemple du feu qui a touché l'usine de Philips est souvent présenté dans la littérature pour souligner l'importance de la gestion des risques dans les chaînes logistiques. En effet, Philips a vu en 2000 son usine de semi-conducteurs à New Mexico partir en fumée. Cette usine représente un fournisseur commun pour Ericsson et Nokia. Nokia a rapidement lancé des commandes auprès d'autres usines de Philips et d'autres fournisseurs japonais et américains. Ce drame a coté à Ericsson, une perte de 400 million de dollars de ses ventes (Chopra et Sodhi, 2004). Le SCRM devient si important du fait que la gravité des risques dépasse l'environnement de la firme et les répercussions peuvent être à une échelle mondiale.

Le but du management des risques des chaînes logistiques est de proposer une méthodologie permettant d'appréhender et de gérer les risques afin de mieux les anticiper. On trouve dans la littérature un grand nombre de méthodes qui décrivent le processus à suivre pour le SCRM suivant cinq phases : identification, analyse, évaluation, traitements et surveillance des risques résiduels (Harland et al., 2003; Hallikas et al., 2004; Kleindorfer et Saad, 2005). En particulier dans le cadre des chaînes logistiques mondiales, Manuj et Mentzer (2008) présentent trois processus pour le SCRM qui sont l'identification, l'évaluation du risque et la mitigation de ses effets.

Jüttner et al. (2003) incitent à développer des nouvelles approches pour aider les décideurs à suivre les vulnérabilités de leurs chaînes logistiques. Selon Rao et Goldsby

(2009), les approches du SCRM doivent se pencher sur la compréhension et la réduction des vulnérabilités d'une chaîne logistique dans son ensemble, plutôt qu'au niveau d'une seule entreprise.

### **2.3.3 Identification et classification des risques**

L'identification des risques est la première étape de l'analyse des risques des chaînes logistiques (Liu et Wang, 2008). Elle peut être réalisée au moyen d'entrevues (Peck, 2005), de brainstorming (Jüttner, 2005; Asbjornslett, 2008), et/ou à partir de l'évaluation de la structure des chaînes logistiques (Bradley, 2014). Hennet et al. (2008) proposent d'identifier les risques des chaînes logistiques à partir d'un balayage minutieux des risques internes et externes aux chaînes logistiques.

Rao et Goldsby (2009) ont effectué une revue de littérature et affirment qu'en parallèle de l'évolution du concept de SCRM, peu de littératures s'intéressent à l'identification des risques. Les risques dans les chaînes logistiques sont difficiles à cerner et à appréhender à cause d'une part de leur complexité et d'autre part, parce qu'elles ne se ressemblent pas. Du fait que le risque est un concept multidimensionnel (Zsidisin, 2003), nous trouvons dans la littérature plusieurs types et classifications.

A partir d'une revue de littérature, Harland et al. (2003) identifient les risques stratégiques, les risques opérationnels, les risques d'approvisionnement, les risques dus aux clients, les risques de dépréciation d'actifs, les risques de compétitivité, les risques de réputation, les risques financiers, les risques fiscaux, les risques réglementaires, et les risques juridiques.

De leur côté, Chopra et Sodhi (2004) identifient neuf catégories de risques en fonction de leurs sources et proposent des solutions pour les atténuer. Ces catégories sont : la perturbation (« disruption »), le retard, la défaillance système, les prévisions, la propriété intellectuelle, l'approvisionnement (procurement), la livraison (receivables), la capacité de production, et le stock. En considérant également une classification en fonction de la source des risques, Manuj et Mentzer (2008) proposent huit classes : les risques liés à l'approvisionnement, les risques opérationnels, les risques liés à la demande, les risques liés à la sécurité, les macros risques, les risques politiques, les risques liés à la compétitivité, et les risques liés aux ressources. Ils finissent par dire que la majorité de ces risques n'existent pas tous seuls. Les quatre dernières classes de risques peuvent se manifester sous la forme d'une combinaison des risques liés à l'offre, la demande, l'opérationnels et la sécurité. Selon Chopra et Sodhi (2004), les risques potentiels des chaînes logistiques comprennent les retards, les interruptions, les inexactitudes de prévision, les pannes des systèmes, les atteintes à la propriété intellectuelle, le risque des

céances, les problèmes des stocks et les problèmes de capacité.

Une première classification des risques peut être obtenue à partir des sources des événements indésirables et des perturbations qui peuvent se présenter dans une chaîne logistique (Liu et Wang, 2008; Kumar et al., 2010 ; Tang, 2006a ) :

- A partir des sources externes tels que les phénomènes naturels, les perturbations financières (variations des taux de change, impôts), les mouvements sociaux (grèves, nouveaux règlements), les problèmes économiques (indisponibilité de certains produits).
- A partir de sources internes tels que les processus de production, les pannes machines, l'approvisionnement, la demande, le contrôle, etc.

En descendant d'un cran, et en détaillant les sources internes des risques, une deuxième classification peut être obtenue à partir des rôles et des activités d'une entreprise dans son environnement, en particulier ses relations avec les autres entreprises. Ces relations se présentent souvent sous forme de flux échangés. Dans (Faisal, 2009), il en découle des risques relatifs à la réputation, au manque de confiance, et à l'aspect juridique. Ainsi, on distingue les risques de l'environnement, les risques internes à la chaîne et qui sont externes aux entreprises (relatifs aux liens inter-entreprises) et les risques internes aux entreprises (Jüttner et al., 2003 ; Christopher et Peck, 2004 ; Lin et Zhou, 2011).

Le tableau suivant résume les classifications des risques des chaînes logistiques qui existent dans la littérature selon plusieurs critères tels que l'origine des événements non souhaités (les risques naturels, les risques de société, etc.), la gravité des conséquences des événements non souhaités, etc.

Classes de risques	Critères de classification	Source
Risque financier, Risque de performance, Risque Physique, Risque Psychologique, Risque sociale, Risque de retard	Selon les effets sur l'entreprise et son environnement	(Harland et al., 2003)
Risque d'environnement, Risque de réseau de connexion Risque d'organisation	Selon la dimension interne et externe de la chaîne logistique	(Christopher et Sodhi, 2004 ; Jüttner, et al. 2003, Jüttner, 2005)
Risque physique Risque d'information Risque financier Risque des relations	Localisation de risque (la chaîne est divisée en sous-chaîne physique, d'informations, financière et de relations)	(Faisal, 2009)
Risque d'environnement	Selon les différentes sources	(Mason-Jones et

Risque de la demande Risque d'approvisionnement Risque des processus Risque de contrôle.		(Towill, 1998)
Risque Matériel, Risque financier, Risque d'information. Risque dans une Entreprise	Classification selon les composants d'une chaîne logistique (flux existants et entreprises)	(Tang et Musa, 2010)
Risque Matériel, Risque financier, Risque d'information.	Classification selon les flux existants	(Li et al., 2011)
Risque perturbateur Risque opérationnel	Classification selon la source d'incertitude des	(Klibi et al.2012, Ivanov D. et al 2014)

Tableau 5 : Classifications des risques des chaînes logistiques.

Dans ce travail de recherche nous adoptons la classification de Christopher et Peck (2004) où les risques sont externes à la chaîne, internes à la chaîne et externes à l'organisation et les risques internes à l'organisation. En effet, cette classification générique permet d'englober toutes sortes de risques.

- Les risques externes à la chaîne sont liés à l'environnement du système tels que les catastrophes naturelles, l'augmentation du terrorisme et de la piraterie, l'instabilité politique, le changement du taux de change, etc.
- Les risques internes à la chaîne et externe à l'entreprise, sont relatifs à l'incertitude des flux de la demande (la variation et la volatilité de la demande, faillite du client, etc.) ou d'approvisionnement (retard ou livraison incomplète des intrants, problème de qualité des produits reçus, problème de capacité du fournisseur, augmentation des prix des intrants, etc.).
- Les risques internes à l'entreprise, que ce soit au niveau du contrôle (sur-stockage, sous-estimation ou sur-estimation de la demande, retard de livraison etc.) ou au niveau du processus de production (problème de qualité interne, capacité de production, accidents internes, etc.).

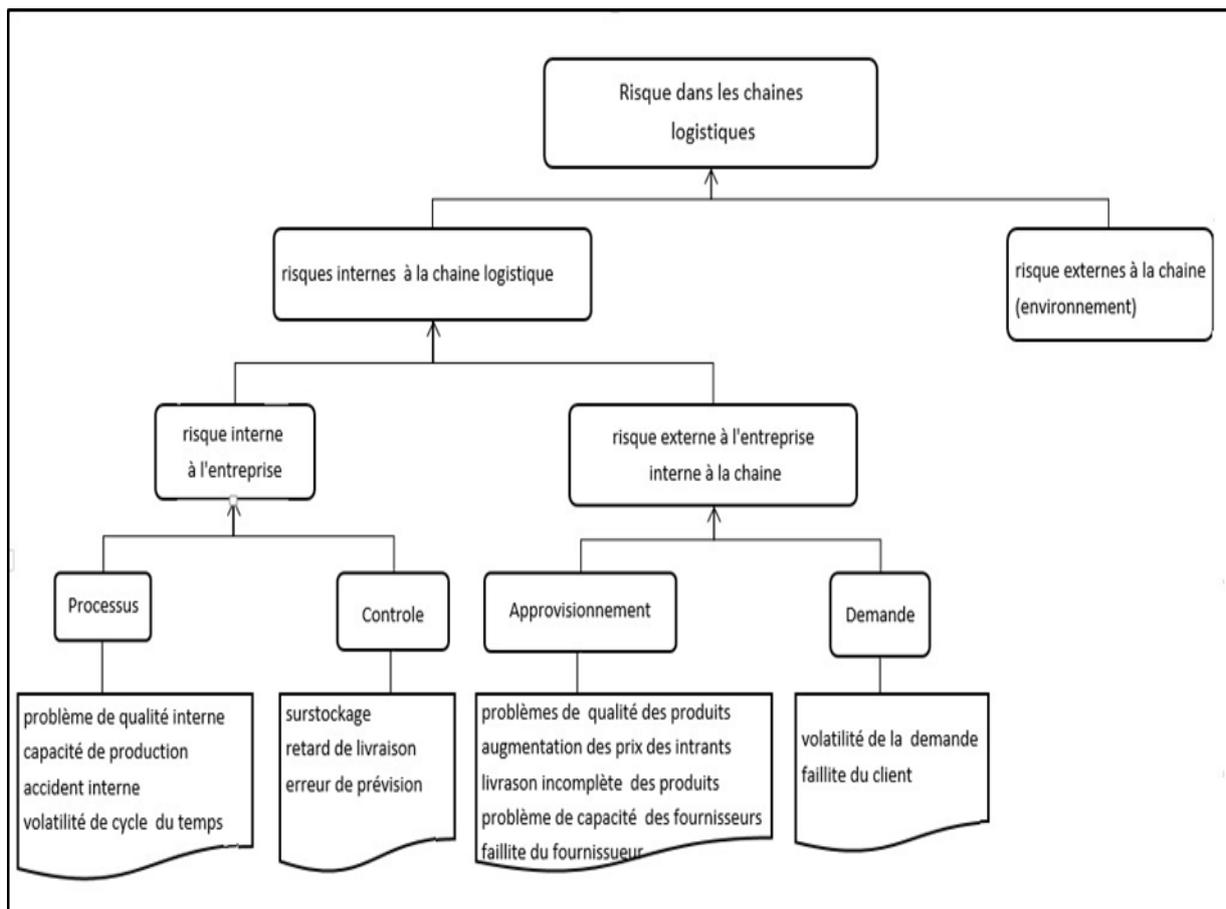


Figure 2-8 : Classification de risques dans la chaîne logistique.

### 2.3.4 Risque versus incertitude dans les chaînes logistiques

Tang et Musa (2010) affirment l'inexistence de différence entre la notion d'incertitude et celle de risque dans la littérature sur la chaîne logistique. Néanmoins, il existe des chercheurs qui distinguent ces deux concepts.

En adoptant la définition de l'incertitude proposée par Milliken (1987) « l'incertitude est définie comme l'incapacité perçue de prédire avec précision quelque chose » (« uncertainty is defined as the perceived inability to predict something accurately »), Manuj et Mentzer (2008) distinguent le risque de l'incertitude en argumentant que « le risque est la conséquence prévue d'un évènement incertain ». Dans le même ordre d'idée, ces auteurs mentionnent que « la principale caractéristique de l'incertitude est l'incapacité de pouvoir procéder soit à une estimation probabiliste, soit au listage de toutes les alternatives possibles des conséquences d'une décision ou d'un évènement » (Manuj, et al., 2008).

Waters (2011) confirme aussi la différence entre les deux concepts en précisant que « la différence fondamentale est que le risque d'événements futures peut faire l'objet de quelques mesures quantifiables, l'incertitude non » (« the key difference is that the risk has some quantifiable measure for future events, uncertainty does not »).

On retrouve cette idée avec Kaplan et Garrick (1981) qui précise qu'on parle de risque lorsque les probabilités des événements considérés sont connues, et d'incertitude lorsqu'elles sont inconnues (« there is a difference between risk and uncertainty, where risk is when you know about the probabilities and uncertainties when you don't »).

Selon la définition de la norme ISO/FDIS 31000 (2009), le risque est défini par l'effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs. Ceci souligne à la fois la différence et la relation entre le concept de risque et celui de l'incertitude.

D'une façon plus générale, un décideur peut se retrouver dans l'une des situations suivantes :

- une situation sous ignorance lorsqu'il n'est pas capable de déterminer ni la probabilité d'occurrence des événements, ni de connaître leurs conséquences ou résultats,
- une situation sous ambiguïté lorsqu'il est capable de connaître les probabilités des événements sans pouvoir déterminer les résultats possibles,
- une situation sous incertitude lorsqu'il peut connaître les résultats possibles sans connaître la probabilité d'occurrence des événements,
- une situation sous risque lorsqu'il est capable de déterminer la probabilité et l'ampleur des conséquences. Une telle situation, où tout est calculable, est certainement plus confortable, mais Hansson (2005), par ce qu'il appelle « le syndrome du smoking », nous rappelle que la réalité a plus d'analogies avec la traversée d'une jungle inexplorée qu'avec le jeu de la roulette.

Stirling (1998, 2007) propose une classification de ces termes en fonction de la connaissance (ou pas) des résultats possibles d'une situation et de la connaissance (ou pas) de leur probabilité d'occurrence (voir la Figure 2-9).

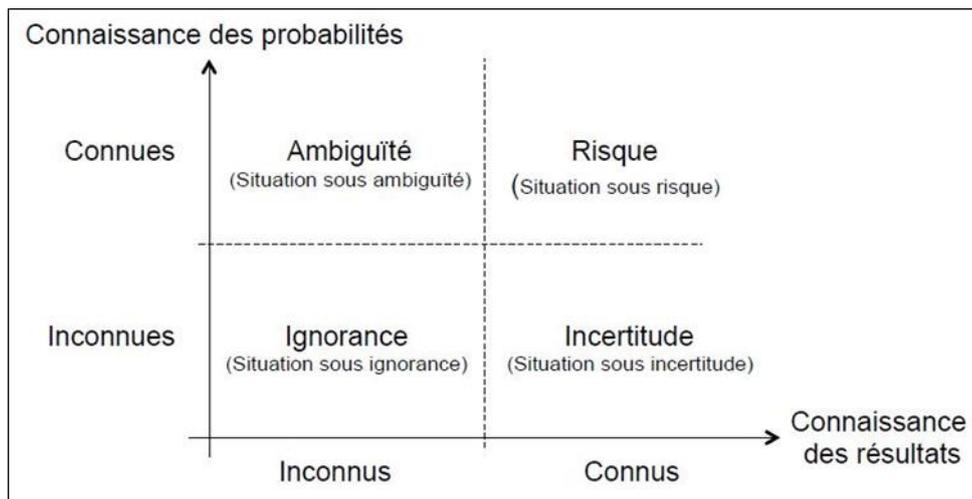


Figure 2-9 : Classification des notions d'Ambiguïté, d'Ignorance, d'Incertitude et de Risque.

Comme exemples d'incertitudes pour la chaîne logistique nous pouvons citer les incertitudes liées à la demande, les incertitudes liées aux coûts et par la suite au prix, les incertitudes sur la capacité et le temps d'opérations, les incertitudes concernant les informations partagées, les incertitudes de la qualité du produit et du service, les incertitudes liées à des décisions humaines, auxquels se rajoute la durée de vie des produits (shelf life) (Tang, 2006a).

### 2.3.5 Vulnérabilité et résilience dans les chaînes logistiques

La complexité des chaînes logistiques augmente le nombre de points de fragilités potentielles. Haywood (2002) indique que l'absence d'une compréhension commune du terme « chaîne logistique » représente un obstacle important à l'identification des vulnérabilités et la mise en œuvre de méthodes appropriées de gestion des risques.

La vulnérabilité dans les chaînes logistiques a été peu étudiée dans la littérature. En 2003, Juttner et al. (2003) définissent la vulnérabilité des chaînes logistiques comme la propension des sources de risque et des facteurs de risque à l'emporter sur les stratégies de réduction du risque, provoquant ainsi des conséquences indésirables (« the propensity of risk sources and risk drivers to outweigh risk mitigating strategies, thus causing adverse supply chain consequences »).

Selon Asbjørnslett (2009) la vulnérabilité d'une chaîne logistique une propriété de la chaîne. La vulnérabilité est ainsi l'image de la sensibilité d'un système aux effets de phénomènes dangereux. C'est en présence de cette sensibilité qu'il y aura des

conséquences. En d'autres termes, sans vulnérabilité le risque est nul (Hennet et al., 2008; Hennet et Mercantini 2010 ; Sakli et al. , 2014).

Ainsi la notion de vulnérabilité présente, dans la littérature, un caractère polysémique. D'un côté elle apparaît comme une conséquence d'un risque, d'un autre côté, elle représente la sensibilité du système. Walker (2007) corrobore cette idée en définissant la vulnérabilité comme « la sensibilité d'une chaîne logistique vis à vis des perturbations et elle est une conséquence des risques ».

Wagner et Bode (2009) présentent le concept de vulnérabilité de la façon suivante :

*« While a supply chain disruption is a trigger that leads to the occurrence of risk, it is not the sole determinant of the final loss. It seems consequential that also the susceptibility of the supply chain to the harm of this situation is of significant relevance. This leads to the concept of supply chain vulnerability. The basic premise is that supply chain characteristics are antecedents of supply chain vulnerability and impact both the probability of occurrence as well as the severity of supply chain disruptions »* (Wagner et Bode 2009).

Étant donné que la vulnérabilité est une propriété du système, nous pouvons dire qu'elle se situe au niveau de la chaîne. Elle peut être au niveau des entreprises ou au niveau de l'interconnexion entre celles-ci, en d'autre terme au niveau des flux échangés. Selon Asbjørnslett (2009), l'analyse de la vulnérabilité, s'intéresse à identifier l'ensemble des menaces et des conséquences, les ressources adéquates pour atténuer et ramener le système à sa stabilité, et réduire le temps d'interruption avant que la nouvelle stabilité soit établie.

La vulnérabilité la plus étudiée dans le domaine des chaînes logistiques est celle relative à l'effet de bullwhip. L'effet du coup de fouet (bullwhip effect) est un phénomène dans lequel la variation de la demande et des stocks se développe à des étages successives de la chaîne logistique (Gilbert, 2005).

La vulnérabilité est centré sur l'endommagement du système. Selon Christopher, et Sodhi (2012), les concepts de résilience (Sheffi, 2005) ou de robustesse (Tang, 2006b) proposent des démarches qui visent à réduire la vulnérabilité d'un système.

Le concept de résilience d'un système est lié à sa capacité de récupération. Une chaîne logistique est dite « résiliente » si elle possède cette capacité d'adaptation indépendamment des événements auxquels elle est soumise. Selon Peck (2006), et Christopher et Peck (2004) le concept de résilience représente « la capacité d'une organisation à absorber ou à atténuer l'impact d'une perturbation ». C'est aussi « la capacité du système à retrouver une nouvelle situation stable après un événement

accidentel » (Asbjørnslett, 2009). En prenant en compte que c'est un concept multidimensionnel, Serhiy et al. (2008) définissent la résilience comme « la capacité d'adaptation de la chaîne logistique à des événements inattendus, de répondre aux perturbations et de se remettre de celles-ci en maintenant la continuité d'activité à un niveau souhaité » (Serhiy, et al. 2008).

## **2.4 Modélisation des chaînes logistiques soumises à des risques**

Au cours de ce paragraphe nous proposons un aperçu des différentes méthodes de modélisation des risques dans les chaînes logistiques, afin de mieux situer nos travaux par rapport à l'existant. Singhal et al (2011) présentent un état de l'art sur les différentes méthodes d'étude du SCRM. Ils distinguent les méthodes conceptuelles, les méthodes empiriques, et les méthodes analytiques.

- Les méthodes conceptuelles visent à définir les concepts de risques dans les chaînes logistiques et à proposer un cadre de gestion de risques.
- Les méthodes empiriques s'appuient sur des enquêtes de terrain suivies d'analyses statistiques (Wanger et Bode 2006), sur des études de cas (Khan et Graves, 2008 ; Juttner, 2005), ou sur les deux à la fois (Ellis et al., 2010).
- Les méthodes analytiques se basent souvent sur des modèles qui permettent de planifier et de coordonner dans un environnement de risque. Ces modèles se classent en modèles mathématiques, en modèles de simulation et en modèles multi-agents.

Selon la même source, afin de planifier et de coordonner dans un environnement de risque, la modélisation analytique et la quantification de risque deviennent obligatoires. Pour évaluer les risques dans les chaînes logistiques, les chercheurs s'intéressent de plus en plus aux méthodes quantitatives. Selon l'étude de Ho et al. (2015), en 2013, les méthodes quantitatives sont devenues trois fois plus utilisées que les méthodes qualitatives.

Ces différentes études ont pour objectifs l'évaluation des risques, le renforcement de la résilience des systèmes et par conséquent sa robustesse, et la réduction de la vulnérabilité face aux diverses perturbations.

En examinant les méthodes quantitatives Ivanov et al., (2015) distinguent deux approches.

- L'approche proactive vise à concevoir des chaînes logistiques en prenant en compte les différentes perturbations possibles (Klibi et al., 2010). Selon Dani 2009 « In a proactive strategy, potential risks are identified at the SC design stage, their probability and impact are assessed and they are ranked in term of importance ». Ce sont des modèles d'aide à la décisions sous certaines contraintes. Il s'agit principalement de reprendre les modèles utilisés pour la conception et la gestion des chaînes logistiques auxquels on intègre des paramètres d'incertitudes et des paramètres qui prennent en considération des aspects comme la flexibilité, la robustesse, et la résilience. À titre d'exemples, on peut citer des modèles basés sur la recherche opérationnelle (Cui et al., 2010), sur les réseaux de Petri (Tuncel et Alpan, 2010; Zegordi et Davarzani, 2012), sur la théorie des graphes (Wagner et Neshat, 2010), sur la fuzzification et la logique floue (Petrovic et al., 1998; Liu et Wang., 2008; Benyoucef et al. 2013; Igoulalene et al., 2015), sur les Arbres de défaillance (Arne et Jan, 2006), sur la simulation (Afsarmanesh et Shadi., 2015), sur les systèmes multi-agents (Ohbyung et al., 2007 ; Giannaikis et Louis, 2011), etc.

- L'approche réactive a pour objectif d'ajuster les processus de la chaîne logistique ainsi que sa structure suite à l'occurrence d'un événement indésirable. Lors de son exécution, la reprise de la chaîne logistique doit s'effectuer rapidement pour accélérer sa stabilisation et son adaptation pour assurer sa continuité et d'éviter les éventuels impacts à long terme. Cette approche s'intéresse à l'évolution de la dynamique du système (ici la chaîne logistique) en exploitant les différents outils de la théorie de la commande comme les équations différentielles (Ivanov et al., 2015).

Ivanov et al. (2015) argumentent l'utilisation de l'approche réactive du fait qu'un grand nombre de problèmes peuvent être exprimés de façon dynamique, comme l'incertitude sur la demande, les incertitudes sur les produits approvisionnés (en termes de qualité, de retard etc.), etc. Plusieurs outils et méthodes peuvent être ensuite mobilisés pour mieux comprendre la dynamique du système. L'avantage de ces méthodes dynamiques est la conduite dans le domaine d'adaptation / récupération.

A titre d'exemples, les travaux de (Wang et al. 2007, Carvalho et al. 2012; Scmitt et Shingh, 2012 ; Ivanov et al., 2013, Xu et al., 2014) s'inscrivent dans cette approche.

La classe de modèle MPC (Model Predictive Control) qui suscite un intérêt particulier chez les chercheurs, ont comme propriété que la dynamique future du système est déterminée par la connaissance de son état présent et de son historique. On y trouve les modèles ARIMA pour modéliser et prévoir la dynamique d'un système face aux incertitudes sur la demande (Graves, 1999 ; Gilbert, 2005 ; Hennet et Mercantini, 2010 ; Sakli et al. 2014,), aux incertitudes sur l'information (Babai et al., 2013), aux incertitudes de lead\_time (Babai et Syntetos, 2007 ; Babai et Dallery, 2009), et aux incertitudes sur la qualité des produits reçus (Sakli et al., 2015).

## 2.5 Conclusion et positionnement de la recherche

La revue de littérature concernant le risque a mis en évidence un univers de connaissances qui a évolué, au cours d'une période de huit siècles, en complexité et précision, en fonction de l'évolution de la pensée humaine et de la complexité croissante des sociétés modernes. Cet univers de connaissances pluridisciplinaires semble, toutefois, avoir atteint une certaine stabilité, tant au niveau de la définition des concepts qui le structurent que des outils théoriques et des méthodes nécessaires à son étude, en particulier lorsqu'on adopte la perspective de l'ingénierie de la sécurité.

Dans ce chapitre, nous avons abordé la question « du risque et de la vulnérabilité dans les chaînes logistiques ». Nous avons distingué plusieurs définitions issues des différents domaines d'études.

L'étude du risque dans les chaînes logistiques est riche en termes de définitions proposées, de risques identifiés, d'approches pour l'appréhender et le gérer, et d'approches utilisées pour le modéliser.

Malgré la croissance importantes de ces études peu d'entre elles s'intéressent à l'évaluation des risques. Nous trouvons

- celles qui cherchent à évaluer le risque dans une chaîne logistique d'une façon générale (Brun et al., 2006; Bogataj et Bogataj, 2007 ; Wu et Olson, 2010; Carvalho et al., 2012 ; Samvedi et al., 2013),
- celles qui se focalisent sur certains risques (Craighead et al., 2007 ; Hult et al., 2010 ; Wang et al., 2011 ; Choi, 2014 ),
- et encore peu d'entre eux qui s'intéressent à l'évaluation des vulnérabilités de ces systèmes (Wagner et Neshat, 2010 ; Berle et al., 2013).

Dans le cadre de cette thèse, notre objectif est de proposer aux décideurs des indicateurs pour évaluer la vulnérabilité et le risque des chaînes logistiques face aux menaces des différentes sources, relatives aux perturbations des flux et de la capacité du système.

Dans ce travail, nous nous intéressons aux chaînes logistiques en tant que systèmes d'échange de flux. A l'instar de Peck et al. (2004), nous nous focalisons sur les risques des chaînes logistiques à travers le prisme des perturbations des flux. En particulier nous nous intéressons aux fortes perturbations relatives à la demande et aux fortes

perturbations relatives à la qualité de flux des produits en tant que des phénomènes dangereux. Pour ce faire, nous poursuivons une approche déterministe.

Dans ce travail de recherche nous supposons que la chaîne logistique est déjà opérationnelle et en cours de fonctionnement. Notre étude suit l'approche réactive, en particulier nous nous intéressons aux séries temporelles à travers les modèles ARIMA qui permettent de modéliser analytiquement les chaînes logistiques à plusieurs étages et de prévoir la dynamique des flux des chaînes logistiques. Nous nous servons de la simulation à événements discrets pour décrire la dynamique du système dans le temps et trouver des indicateurs de déséquilibre face aux perturbations des flux et afin d'avoir une idée sur le comportement d'une chaîne logistique quand on dépasse les capacités du stockages ou les capacités des fournisseurs, et par conséquent anticiper les problèmes qui peuvent en résulter et réagir au plus vite et au mieux pour les éviter les différents dégâts possibles.



## **Partie II : Modélisation d'une chaîne logistique confrontée à des risques**

# Introduction Partie II

Nous cherchons dans cette thèse à nous inscrire dans la lignée des auteurs qui ont essayé d'étudier le risque en poursuivant une approche réactive. Dans l'approche réactive on se base sur la modélisation dynamique d'un système. Nous avons eu recours aux séries temporelles en particulier aux processus ARIMA de Box-Jenkins (1976), basés sur l'unification des modèles dits autorégressifs, intégrés et à moyenne mobile. Notre guide de référence est bien évidemment les travaux de (Graves, 1999), (Vuttichai, 2004), et (Gilbert, 2005).

Dans cette partie, nous situons le cadre formel des modèles auxquels nous nous intéressons. Dans le troisième chapitre, les notions de base sur les séries chronologiques sont abordées. Ce chapitre traite la modélisation des chaînes logistiques à l'aide de ARIMA. Notre unité de modélisation est une entité de fabrication avec son stock. Nous considérons que cette entité est autonome et donc assimilable à une entreprise indépendante. Nous allons voir que ce modèle a l'avantage de décrire et de prévoir la dynamique de système, en utilisant simultanément trois séries ARIMA, ce qui s'avère intéressant vu qu'il y a une certaine dépendance entre ces séries.

Un exemple de chaîne logistique à deux étages sera simulé pour étudier l'effet Bullwhip.

Dans le Chapitre 3 on suppose que la moyenne de la demande est assez grande par rapport à son écart type afin d'éviter d'avoir une probabilité de demande négative dans une période  $t$ , mais il se trouve que dans certains cas nous pouvons avoir un stock négatif ou une quantité de commande négative. Nous proposons dans le Chapitre 4 une modélisation d'une chaîne logistique à l'aide de modèle ARIMA sous contraintes. Des contraintes de capacité et de positivité du système seront intégrées au modèle proposé dans le Chapitre 3. Ceci permet d'éviter d'avoir des valeurs relatives aux niveaux du stock ou relatives aux quantités des commandes qui n'ont pas de sens dans la réalité. Des indices et des indicateurs de vulnérabilités permettant d'étudier le comportement de la chaîne en cas de violation de l'une ou plusieurs contraintes définies seront également proposés.

# Chapitre 3. Modélisation d'une chaîne logistique à partir des modèles ARIMA

## 3.1 Introduction

La modélisation de la chaîne logistique représente un grand challenge du fait qu'il faut représenter non seulement la chaîne logistique mais aussi analyser des phénomènes qu'on peut observer tels que la propagation des temps d'attentes, la variation des prix, l'effet bullwhip, etc.

Pour prendre en compte les différentes incertitudes liées à la chaîne logistique, les modèles analytiques permettent de représenter ce système à l'aide des équations décrivant son fonctionnement. Des tels modèles sont appelés par Ganeshan et al. (1999) des modèles quantitatifs. Certains modèles sont déterministes avec des paramètres connues, et d'autres probabiliste décrivant le système à l'aide des processus stochastiques où certains paramètres suivent une loi de probabilité (Maria, 1997).

Nous allons rester dans le cadre des processus stochastique, en particulier dans le cas discret où l'on choisit une représentation de la demande sous forme ARIMA, une série chronologique univariée combinant à la fois un processus Auto-regressif (AR), un processus intégré (I) et un processus à moyenne mobile (MA).

Ce chapitre est indispensable pour la clarté du reste de la thèse. Tout d'abord, nous rappelons les concepts fondamentaux des séries temporelles ARIMA. Ensuite, nous présenterons une étude détaillée sur la modélisation de la chaîne logistique à l'aide du modèle ARIMA.

A la fin, nous étudions une vulnérabilité réputée dans le domaine de la chaîne logistique, qui est l'effet bullwhip.

## 3.2 Généralités sur les modèles ARMA

### 3.2.1 Séries chronologiques/temporelles

Les séries chronologiques, nommées aussi séries temporelles, représentent l'évolution de variables dans le temps. Leur construction repose sur l'analyse statistique d'observations régulièrement espacées dans le temps. Elles ont été utilisées dans divers

domaines comme l'astronomie, la météorologie, la théorie du signal, etc.

L'objectif de l'utilisation des séries temporelles est d'analyser, de décrire et d'expliquer un phénomène au cours du temps et d'en tirer des prévisions sur lesquelles on se base pour aider à la prise de décisions.

### **Définition 3.1** *Série chronologique*

On appelle série chronologique, ou série temporelle, une suite d'observations  $(Y_t, t \in \mathcal{T})$  ordonnées dans le temps, où  $\mathcal{T}$  est un espace des temps. Cet espace peut être continu, on parle dans ce cas d'une série continue, ou discret on parle dans ce cas d'une série discrète.

En économétrie classique, la représentation en série temporelle se base sur la tendance stationnaire d'un processus. La série temporelle est dite stationnaire quand les propriétés de la série ne dépendent pas de la date à laquelle on l'observe.

Dans cette thèse nous nous intéressons à une classe particulière de séries temporelles qui est la classe des processus autorégressifs intégré à moyennes mobiles (ARIMA).

## **3.2.2 Les modèles ARIMA**

La classe des modèles ARIMA (Box et Jenkins, 1976) est la représentation la plus utilisée d'une série chronologique. Les modèles ARIMA sont construits pour représenter le comportement des processus soumis à des chocs aléatoires au cours du temps. Les chocs aléatoires représentent des événements aléatoires (grèves, krach boursier, attentats, etc.), appelés aussi perturbations, qui affectent le comportement temporel de ces processus.

Le modèle ARIMA est une combinaison entre un processus autorégressif (AR), un processus intégré (I) et les moyennes mobiles (MA). Nous allons dans la suite présenter ces différents processus.

### **3.2.2.1 Processus AR (Autorégressive)**

C'est un modèle de régression pour une série temporelle dans lequel la série est expliquée par ses valeurs du passé plutôt que d'autres variables. Un processus autorégressif suggère que le phénomène étudié n'est pas déterminé par une valeur de référence. Ce sont les valeurs précédentes qui déterminent entièrement la valeur présente.

### **Définition 3.2** *Processus Autorégressif*

On dit qu'un processus  $\{Y_t\}$ ,  $t \in \mathbb{Z}$ , suit un modèle autorégressif d'ordre<sup>5</sup>  $n$ , s'il s'écrit sous la forme suivante :

$$Y_t = \mu + \sum_{i=1}^n \phi_i (Y_{t-i} - \mu) + \varepsilon_t \quad (3.1)$$

- $\mu$ , est une constante décrivant la valeur de référence qui peut être considérée comme une caractéristique stable du système étudié (par exemple la capacité, la moyenne, etc.),
- $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$  sont les paramètres du modèle
- $n$  est l'ordre du processus (c'est à dire le nombre des termes à utiliser).
- et  $\varepsilon_t$  un bruit blanc<sup>6</sup>.

**Propriété 3.1** Un processus Autorégressif est toujours inversible mais il n'est pas forcément stationnaire.

### Définition 3.3 Bruit blanc

Un processus  $\varepsilon_t$ ,  $t \in \mathcal{T}$ , où  $\mathcal{T}$  est un ensemble dénombrable quelconque, est appelé bruit blanc stationnaire si les variables  $\varepsilon_t$  sont i.i.d. (distribution indépendante et identique) à espérance mathématique  $E(\varepsilon_t) = 0$ . En d'autres termes un bruit blanc  $\varepsilon_t$  est une série temporelle définie par:

$$\begin{cases} E(\varepsilon_t) = 0 \\ \text{var}(\varepsilon_t) = \sigma^2 \\ \text{cov}(\varepsilon_t, \varepsilon_{t+1}) = E(\varepsilon_t, \varepsilon_{t+1}) = 0 \end{cases} \quad \forall t$$

Il sera appelé bruit blanc Gaussien si la distribution de chaque variable aléatoire  $\varepsilon_t$  est Gaussienne.

---

<sup>5</sup> D'habitude on parle d'un AR d'ordre  $p$ , vue les variables utilisées dans ce manuscrit, nous utilisons un «  $n$  » à la place d'un «  $p$  ».

<sup>6</sup> Le terme bruit blanc vient de la théorie du signal. A l'instar de la lumière blanche qui est un mélange de toutes les couleurs, le bruit blanc est composé de toutes les fréquences, où la densité spectrale de puissance est la même pour toutes les fréquences

### 3.2.2.2 Processus MA (Moyenne Mobile)

Les modèles à moyenne mobile suggèrent que la valeur moyenne de la série présente des fluctuations. Avec ce processus, la valeur de référence évolue d'une mesure à une autre. Plus précisément, la valeur de référence est en fonction de la valeur de référence précédente et de l'erreur ayant entachée la mesure précédente.

**Définition 3.4** Processus à moyenne mobile

On appelle un processus à moyenne mobile d'ordre<sup>7</sup>  $m$ , le processus  $\{Y_t\}$ ,

$t \in \mathbb{Z}$ , s'écrivant comme suit :

$$Y_t = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^m \theta_i \varepsilon_{t-i} \quad (3.2)$$

Où

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$  sont les paramètres du modèle et  $m$  l'ordre du processus.

Une moyenne mobile en  $t$  étant donc une combinaison linéaire finie des valeurs de la série correspondant à des dates entourant  $t$ , elle réalise ce qu'on appelle un lissage de la série. Le but d'un lissage est de faire disparaître la saisonnalité et de réduire au maximum le bruit blanc. Le lissage avec la moyenne mobile permettra de faire apparaître l'allure de la tendance de la grandeur étudiée en d'autres termes l'évolution à long terme de cette grandeur.

La correction des variations saisonnières est une technique que les statisticiens emploient pour éliminer l'effet des fluctuations saisonnières normales sur les données, de manière à en faire ressortir les tendances fondamentales (tendance et composante irrégulière). Les méthodes de dessaisonnalisation s'efforcent d'extraire la composante saisonnière des séries afin de rendre évidentes les fluctuations plus intéressantes (d'un point de vue économique).

**Propriété 3.2** Un processus à moyenne mobile d'ordre  $m$ , MA( $m$ ), est toujours

---

<sup>7</sup> D'habitude on parle d'un MA d'ordre  $q$ , vue les variables utilisées dans ce manuscrit, nous utilisons un «  $m$  » à la place d'un «  $q$  »

stationnaire.

### 3.2.2.3 Processus ARMA

Un modèle ARMA (n, m) est un modèle à la fois AR(n) et MA(m) précédemment présentés.

#### Définition 3.5 Processus ARMA

Un processus ARMA est la combinaison linéaire d'un processus auto régressif AR(n) et un processus à moyenne mobile MA(m). La série temporelle ARMA  $Y_t$  s'écrit alors sous la forme:

$$Y_t = \mu + \sum_{i=1}^n \phi_i (Y_{t-i} - \mu) + \varepsilon_t - \sum_{i=1}^m \theta_i \varepsilon_{t-i} \quad (3.3)$$

Dans la notation ARMA( n, m), la lettre  $n$  indique l'ordre du polynôme autorégressif et la lettre  $m$  indique l'ordre du polynôme de moyenne mobile.

L'équation (3.3) peut avoir une représentation en termes d'opérateurs en appliquant l'opérateur de retard.

#### Définition 3.6 Opérateur de retard

Soit  $q^{(-1)}$  un opérateur de retard. Cet opérateur est par convention défini par :

$$\begin{cases} q^{-1}Y_t = Y_{t-1} \\ et \\ q^{-n}Y_t = Y_{t-n}. \end{cases}$$

Cet opérateur permet d'écrire un processus à partir des réalisations du passé. En utilisant l'opérateur de retard  $q^{(-1)}$  l'équation (3.3) devient :

$$(Y_t - \mu) - \phi_1 q^{-1} (Y_t - \mu) - \phi_2 q^{-2} (Y_t - \mu) - \dots - \phi_n q^{-n} (Y_t - \mu) = \varepsilon_t - \theta_1 q^{-1} \varepsilon_t - \theta_2 q^{-2} \varepsilon_t - \dots - \theta_m q^{-m} \varepsilon_t \quad (3.4)$$

Nous écrivons :

$$\phi (q^{-1}) (Y_t - \mu) = \theta (q^{-1}) \varepsilon_t \quad (3.5)$$

$\Phi(q^{-1})$  est appelé opérateur autorégressif d'ordre  $n$ , et  $\theta(q^{-1})$  désigne l'opérateur de moyenne mobile d'ordre  $m$ , avec :

$$\phi(q^{-1}) = 1 - \phi_1 q^{-1} - \phi_2 q^{-2} - \dots - \phi_n q^{-n}$$

et

$$\theta(q^{-1}) = 1 - \theta_1 q^{-1} - \theta_2 q^{-2} - \dots - \theta_m q^{-m}$$

**Propriété 3.3** Un résultat classique relatif aux séries chronologique stationnaire du second ordre, est que  $Y_t$  peut s'écrire sous la forme d'un processus à moyenne mobile  $MA(\infty)$ . Ce résultat est connue sous le nom de théorème de Wold ou parfois la décomposition de Wold.

$$Y_t = \mu + \sum_{j=0}^{\infty} \psi_j \varepsilon_{t-j} \quad (3.6)$$

$$\text{Où } \psi_0 = 1, \psi_j \in \mathbb{R} \quad \forall j \in \mathbb{N}^*, \text{ et } \sum_{j=0}^{\infty} \psi_j^2 < \infty$$

Ainsi, on peut écrire  $Y_t$  comme suit

$$\begin{aligned} Y_t &= \mu + \varepsilon_t + \psi_1 \varepsilon_{t-1} + \psi_2 \varepsilon_{t-2} + \dots \\ Y_t &= \mu + \psi(q^{-1}) \varepsilon_t \end{aligned} \quad (3.7)$$

$\psi(q^{-1})$  est une fonction de transfert de la série de bruit blanc  $\varepsilon_t$ . Cette présentation en fonction du transfert permet de déterminer l'effet de la série exogène, ici  $\varepsilon_t$ , sur la série de sortie  $Y_t$ . Il est important de définir un processus ARIMA qui commence à partir de 0. En effet, l'expression (3.6) n'est pas convergente quand on considère un bruit blanc  $\varepsilon_t$  quelconque avec un  $t \in \mathbb{Z}$ . En revanche quand on suppose que le processus commence à 0 le problème de convergence ne suppose plus.

### Démonstration

Dans l'expression (3.6), la série temporelle  $Y_t$  est représentée par une fonction linéaire de transfert d'une série de bruits. Pour obtenir ce résultat, nous divisons l'équation (3.5) par  $\varphi(q^{-1})$  et nous nous retrouvons avec une série stationnaire s'écrivant comme suit :



La série  $Y_t$  serait calculée dans ce cas à l'aide des  $\psi_j$  précédemment déterminés.

### 3.2.2.4 Processus ARIMA

Dans le cas pratique, beaucoup de séries temporelles, en particulier celles dans le domaine économique et commercial sont saisonnières avec une tendance cyclique. Elles peuvent avoir des moyennes non constantes, des variances qui dépendent du temps etc. Dans ce cas, la série temporelle est dite non stationnaire.

Une classe type de séries non stationnaire est celle des séries ARIMA ( Auto Regressive Integrated Moving Average). Cette catégorie de séries a été formalisée par Box et Jenkins (1976) et devient désormais très populaire.

Si la série  $Y_t$  est non stationnaire suivant ARIMA, on effectue des différenciations jusqu'à avoir un comportement stationnaire, d'où la lettre  $I$  comme « Integrated ». Pour indiquer le nombre de fois où le calcul différentiel a été effectué, on rajoute la lettre  $d$  et on parle dans ce cas d'ARIMA(n, d, m).

**Note :** pour un processus ARIMA  $(0, d, m)$  on utilise souvent l'abréviation IMA( $d, m$ ) comme « Integrated Moving Average ».

D'une façon générale, quand le processus  $Y_t$  n'est pas stationnaire, ce dernier peut être remplacé par un autre processus qui est stationnaire. Ce processus est obtenu à l'aide d'un opérateur de différenciation  $\nabla$  (voir Définition 3.7).

Pour qu'un processus soit stationnaire la moyenne, la variance et l'autocorrélation devraient être à peu près constante à travers le temps.

#### **Définition 3.7** Opérateur de différenciation

L'opérateur de différenciation  $\nabla$ , satisfait la relation suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla Y_t = (1 - q^{-1}) Y_t \\ \text{et} \\ \nabla^d Y_t = (1 - q^{-1})^d Y_t \end{array} \right.$$

Appliquons cette relation à l'équation (3.5), nous obtiendrons l'équation (3.9)

$$\phi(q^{-1}) \nabla^d Y_t = \theta(q^{-1}) \varepsilon_t \quad (3.9)$$

Ou encore

$$\varphi(q^{-1})(Y_t) = \theta(q^{-1})\varepsilon_t \quad (3.10)$$

avec

$$\varphi(q^{-1}) = \phi(q^{-1}) \nabla^d$$

Dans ce cas,  $\varphi(q^{-1})$  est appelé opérateur autorégressif intégré. Ce polynôme est d'ordre  $n+d$ .

### 3.2.3 Identification d'un modèle ARIMA

Quand on cherche à identifier un modèle ARIMA pour représenter mathématiquement des données constituées de valeurs observées à des intervalles de temps réguliers, il s'agit de trouver les paramètres de modèle,  $n, m, d$ , les  $\phi_i, i=1 \dots n$  et  $\theta_j, j=1 \dots m$ . Pour les mêmes données nous pouvons obtenir plusieurs modèles ARIMA. Le modèle à choisir doit, non seulement expliquer le mieux possible les données observées, mais aussi aider à prédire l'évolution futur du système correspondant. Il est donc très important d'avoir un modèle qui représente ces données d'une façon fidèle.

Box et al. (2013) proposent une méthode, comportant trois étapes pour identifier un modèle ARIMA. Si on suppose que la série est non stationnaire, la méthode consiste, d'abord, à trouver l'ordre du processus, en d'autres termes, les valeurs de  $n, d$  et  $m$ . Après cette phase d'identification de l'ordre, on cherchera à estimer les paramètres les  $\phi_i, i=1 \dots n$  et  $\theta_j, j=1 \dots m$ . La troisième étape consiste à tester la validité du processus obtenu. Nous synthétisons cet algorithme dans la Figure 3.1.

Avant de détailler ces étapes, nous donnons dans la suite les définitions respectives des fonctions d'autocorrélation et d'autocorrélation partielle, outils utilisés pour l'identification de l'ordre de processus.

#### **Définition 3.8** *Fonction d'auto-covariance et d'autocorrélation*

Soit  $Y_t, t \in \mathbb{Z}$  une série chronologique. La fonction d'auto-covariance fournit une visibilité sur la variabilité de la série. Elle fournit aussi une information sur les liaisons temporelles qui existent entre les diverses composantes la série.

La fonction d'auto-covariance mesure la covariance entre une variable à la date  $t$  et cette même variable à d'autres dates. Soit un délais  $l \in \mathbb{Z}$ , la fonctionne d'auto-covariance  $\gamma(l)$  s'écrit:

$$\gamma(l) = Cov(Y_t, Y_{t-l}) = E[(Y_t - E(Y_t))(Y_{t-l} - E(Y_{t-l}))]$$

La fonction d'autocorrélation est définie par

$$\rho(l) = \frac{\gamma(l)}{\gamma(0)}$$

Où  $\gamma(0) = \text{Var}(Y_t) = \sigma_Y^2$

**Définition 3.9** Fonction d'autocorrélation partielle

La fonction d'autocorrélation partielle  $r(l)$  se définit par :

$$r(l) = \text{corr}(Y_t, Y_{t-l} / Y_{t-1}, \dots, Y_{t-h+1})$$

**Etape 1 : Identification.**

1. Au niveau de la première étape il faut s'assurer que la série des données est stationnaire. Si la série n'est pas stationnaire, il faut différencier la série on aura dans ce cas le paramètre  $d$ .
2. Au niveau de la deuxième étape, des techniques sont utilisées pour identifier l'ordre d'un processus ARMA. Les principaux outils utilisés pour identifier l'ordre de la composante autoregressive ( $n$ ) et celle de la composante à moyenne mobile ( $m$ ), sont la détermination des fonctions d'autocorrélation simple (AFC), et d'autocorrélation partielle (PAFC). Le choix des paramètres  $n$  et  $m$ , s'obtient par l'observation des corrélogrammes<sup>8</sup> de ces fonctions :

En raison de la complexité de la modélisation ARIMA, les degrés de  $n, d, m$ , couramment utilisés dans la pratique ne sont pas plus de deux (Vuttichai, 2004).

**Etape 2 : Estimation.**

Après avoir déterminé l'ordre du processus ARIMA, cette phase a comme but de déterminer les paramètres  $\phi_i, i=1 \dots n$  et  $\theta_j, j=1 \dots m$ . Il y a plusieurs méthodes qui permettent de déterminer ces paramètres. Exemples la méthode de Yule-Walker pour un processus AR( $n$ ), et Box et Jenkins ou Rissanen-Hannan pour ARMA( $n, m$ ).

**Etape 3 : Validation.**

---

<sup>8</sup> La figure relative à la fonction autocorrélation.

Le test de validation consiste à vérifier les résidus sont bien du bruit blanc. Si le modèle est non valide on revient à la phase de l'identification.

La Figure 3.1 illustre l'algorithme d'identification d'un processus ARIMA.

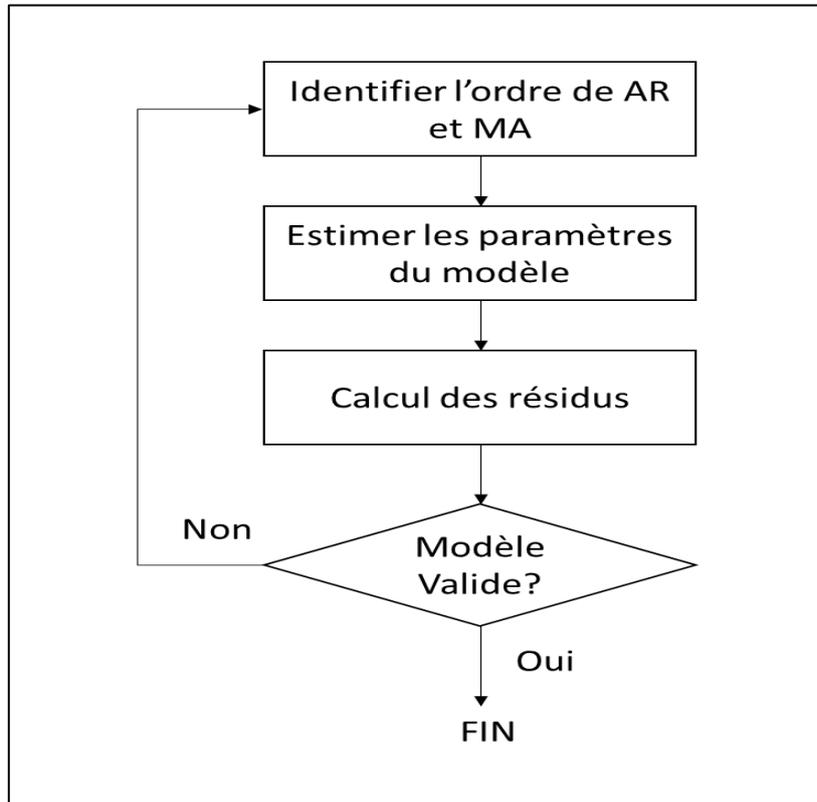


Figure 3-1 : Algorithme de Box et Jenkins pour Identifier un processus ARIMA

### 3.2.4 Prévision à l'aide d'ARIMA

Dans cette section nous allons voir comment on effectue une prévision à l'aide d'ARIMA. Soit  $Y_t$  une série temporelle ARIMA s'écrivant sous la forme :

$$\varphi(q^{-1})Y_t = \theta(q^{-1})\varepsilon_t$$

Si on est à une date  $t$  et on veut effectuer une prévision de  $Y_{t+L}$ , une valeur qui est à un délai  $L$  dans le futur. Bien évidemment selon cette écriture,  $L$  est un entier positif quelconque.

Pour avoir une prévision de  $Y_{t+L}$ , il est plus facile d'écrire  $Y_t$  sous forme d'une fonction linéaire de transfert d'une série de bruits.

$$Y_t = \sum_{j=0}^{\infty} \psi_j \varepsilon_{t-j}$$

Et pour  $Y_{t+L}$  :

$$Y_{t+L} = \sum_{j=0}^{\infty} \psi_j \varepsilon_{t+L-j}$$

Le calcul de l'espérance mathématique conditionnelle de  $Y_{t+L}$  sachant son passé jusqu'à la date  $t-L$  et qu'on le note  $E(Y_{t+L}|Y_t, Y_{t-1}, \dots)$  est donné par :

$$E(Y_{t+L}|Y_t, Y_{t-1}, \dots) = \hat{Y}_t(L)$$

avec  $\hat{Y}_t(L) = \psi_L \hat{\varepsilon}_t + \psi_{L+1} \hat{\varepsilon}_{t-1} + \dots$

Comme les  $\varepsilon_j$  sont une suite de variables aléatoires indépendantes de moyenne nulle et de variance  $\sigma_\varepsilon^2$ , le prédicteur sera nul dès que délai  $L$  dépasse  $m$ . Les valeurs des bruits non encore réalisées seront remplacées par des zéros. En d'autres termes nous avons :

$$E(\varepsilon_{t+j}|\varepsilon_t, \varepsilon_{t-1}, \dots) = 0 \quad \forall t > j$$

A partir de la date  $t$ , l'expression de  $Y_{t+L}$  s'obtient en calculant :

$$\begin{aligned} Y_{t+L} &= (\varepsilon_{t+L} + \psi_1 \varepsilon_{t+L-1} + \dots + \psi_{L-1} \varepsilon_{t+1}) + (\psi_L \varepsilon_t + \psi_{L+1} \varepsilon_{t-1} + \dots) \\ &= e_t(L) + \hat{Y}_t(L) \end{aligned}$$

L'erreur de prédiction est

$$e_t(L) = Y_{t+L} - \hat{Y}_t(L) \tag{3.11}$$

Pour avoir une prévision la plus optimale on cherche à minimiser l'erreur de prédiction donnée par l'équation (3.11).

### 3.3 Modélisation des chaînes logistiques par le modèle ARIMA

Pour étudier le comportement de la chaîne logistique il faut en premier lieu la modéliser. Dans ce travail nous supposons que notre chaîne est une série d'entités de fabrications. On considère que chaque entité est autonome, et par conséquent, nous

pouvons l'assimiler à une entreprise indépendante. Chaque entité sera désignée par le terme étage. A chaque période  $t$ , les étages échangent le flux d'information, comportant la demande des clients  $D_t$  et les commandes  $O_t$ , et le flux physique, composé de matières reçu par un étage ( $R_t$ ). Le niveau du stock pour chaque période  $t$  est désigné par  $I_t$ .

Nous considérons que les commandes sont déclenchées à partir de l'étage en aval et qu'elle prend  $L$  périodes pour être reçues. Le délai  $L$  englobe le temps nécessaire pour la préparation de la commande, la phase de fabrication, et/ou le temps du transport.

Nous supposons que la demande est aléatoire et incertaine, sous forme d'un processus ARIMA. Nous supposons également que la quantité des produits reçus à la date  $t$  est égale à la quantité des produits commandés à une date  $t-L$  (c'est-à-dire,  $R_t = O_{t-L}$ ). A l'instar de (Graves, 1999 ; Vuttichai, 2004 ; Gilbert, 2005 ; Gilbert et Vuttichai, 2006 ; Hennet et Mercantini, 2010), la modélisation de la chaîne consiste à formuler trois équations qui décrivent la dynamique de chaque étage de la chaîne (Voir Figure 3-2).

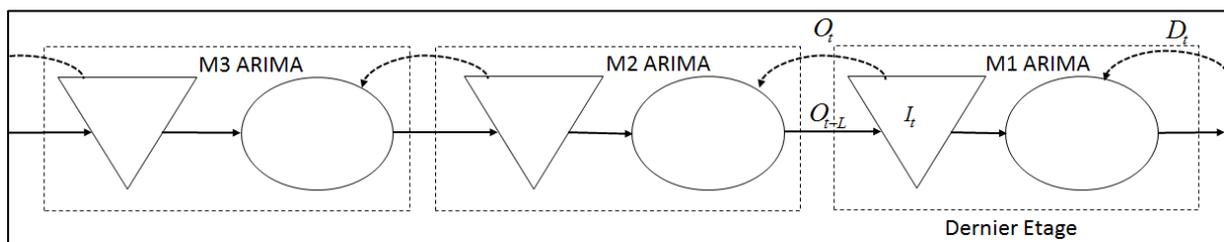


Figure 3-2 : Présentation modulaire d'une chaîne logistique.

Selon Lee et Billington (1993) l'approche de modélisation d'une chaîne logistique entière à base des modèles élémentaires des étages qui le forment, a été introduite par Graves (1988). Suivant cette approche, le modèle a l'avantage d'être utilisé dans un cadre centralisé (lorsque toutes les variables de décision sont optimisées simultanément) ou en mode de contrôle décentralisé (lorsque les variables de décision sont optimisées de proche en proche pour tous les sites).

L'utilisation du modèle ARIMA n'est pas nouvelle dans la littérature. Lee et al. (1994) prennent en considération l'incertitude sur la demande et analysent mathématiquement une chaîne logistique formée par deux étages. Ils ont utilisé une demande AR(1) pour analyser l'effet du partage d'information (l'information considérée est la quantité à commander). Ils montrent que la variation de la commande dépasse la variation de la demande ; un phénomène connu sous le nom de l'effet bullwhip.

En supposant que la demande est linéaire et aléatoire sous forme ARIMA (0,1,1), Graves (1999) propose une modélisation d'une chaîne logistique en exprimant le flux de la demande, le niveau du stock et la quantité de commande à passer. La politique d'ordre adaptée est celle de stock nominal (base Stock).

Pour une demande ARIMA  $(m, d, n)$  et sous la politique d'ordre « Order up to » de l'algorithme MRP, Gilbert (2005) propose un modèle de la chaîne à partir duquel il déduit une évaluation de l'effet bullwhip sur le stock et sur les commandes.

Ce modèle a été généralisé par Gilbert et Vuttichai (2006) pour représenter une chaîne logistique linéaire indépendamment de la politique de commande adoptée lors des planifications. Dans ces différents travaux, l'écart type de la demande est supposé largement plus petit que la moyenne de la demande. Cette hypothèse permet de diminuer la probabilité d'avoir une demande négative.

Dans le cadre de cette thèse, nous adaptons la modélisation de Gilbert (2004) qui consiste à représenter le dernier étage (en aval) de la chaîne sous forme ARIMA en donnant les équations relatives à la demande, à la commande, et au stock. Ce modèle permet de représenter une chaîne contenant plusieurs étages. En effet des modèles ARIMA sont alors générés pour les étages en amont jusqu'à l'obtention d'une modélisation de toute la chaîne logistique (M2, M3, etc.).

Pour des structures de chaîne plus générales, le modèle de Gilbert repose sur l'algorithme MRP (Materials Requirements Planning ou planification des besoins en composants.). Le modèle MRP, détaillé par Vollman et al. (1997), est utilisé pour déterminer « combien » et « quand » il faut commander et il faut fabriquer. Cet algorithme se repose sur des calculs en cascade des besoins en produits en se basant sur la demande du client final. Le but de l'algorithme MRP est de minimiser des niveaux du stock en assurant la livraison selon le planning élaboré. Il consiste à :

- Prévoir la demande,
- Evaluer le niveau du stock,
- Déterminer la quantité à commander.

Pour chaque étage, et pour chaque période de planification, la méthode comporte donc trois étapes successives. Il s'agit d'effectuer une estimation préliminaire de la demande de client, de déterminer le niveau du stock des produits dans les entrepôts, puis calculer la quantité des produits ou des composants à commander.

Afin de présenter un modèle d'une chaîne logistique, Gilbert (2005) se base sur les travaux de Box et Jenkins (1976). L'hypothèse de base est que la demande peut être écrite sous forme ARIMA. En supposant que la politique d'approvisionnement est « Order up to », et à partir du modèle de la demande, on détermine le niveau du stock pour chaque entreprise ainsi que la quantité des produits à commander. Le modèle comporte trois équations pour modéliser chaque étage. Nous décrivons dans la suite la façon de les écrire.

### 3.3.1 Représentation de la demande

La demande représente l'évolution de la consommation d'un produit fini par un client final. Quand une entreprise passe des commandes à son fournisseur, elle transmet également des informations sur la demande des clients. L'information sur la demande peut être connue à l'avance (ferme) ou incertaine souvent de nature aléatoire. La formulation mathématique d'une demande stationnaire  $D_t$  sous forme d'ARMA est proposée par Box et Jenkins (1971) comme suit :

$$D_t = \mu + \sum_{i=1}^n \phi_i (D_{t-i} - \mu) + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^m \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (3.12)$$

Ou encore :

$$(D_t - \mu) - \phi_1 (D_{t-1} - \mu) - \phi_2 (D_{t-2} - \mu) + \dots + \phi_n (D_{t-n} - \mu) = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_m \varepsilon_{t-m} \quad (3.13)$$

$D_t$  est la demande à la période  $t$ ,  $\mu$  une constante qui représente la moyenne de la demande et  $\varepsilon_t$  un bruit blanc.

Pour déterminer la quantité des produits à approvisionner et à produire, une entreprise a besoin d'avoir une idée sur la demande du marché. Dans le cas d'une demande incertaine, on fait recours à la prévision de la demande .

### 3.3.2 Prévision de la demande

A partir de l'équation (3.13) (3.11), nous pouvons écrire la demande sous la forme d'une fonction linéaire du transfert calculée dans ce cas à l'aide des  $\psi_i$  précédemment déterminés (voir . Ainsi nous écrivons une demande exprimée à l'aide des chocs aléatoires comme suit

$$D_t = \mu + \varepsilon_t + \psi_1 \varepsilon_{t-1} + \psi_2 \varepsilon_{t-2} + \dots$$

La demande  $D_t$  est exprimée dans ce cas, à l'aide d'un processus de bruit blanc  $\varepsilon_t$  est une séquence de variables aléatoires indépendantes.

#### 3.3.2.1 Prévision d'une demande sous ARIMA (0, 1, 1)

Graves (1999) utilise un lissage exponentiel pour prévoir une demande qui suit le modèle ARIMA (0, 1, 1) ou tout simplement IMA (1, 1). Selon Muth (1960) et Box et al. (1994), cette méthode fournit une prévision à moyenne quadratique minimale pour ce

processus .

Le lissage exponentiel simple consiste à calculer la nouvelle valeur prédite en fonction de la moyenne pondérée de l'observation courante et de l'observation précédente prédite :

$$\hat{D}_t = (1 - \alpha) D_{t-1} + \alpha \hat{D}_{t-1}$$

La constante  $0 \leq \alpha \leq 1$  est appelée le facteur d'oubli. Si on veut donner plus d'importance au terme d'innovation, c'est-à-dire prendre en compte d'avantage les valeurs récentes, il faut choisir  $\alpha$  proche de 0.

### 3.3.2.2 Prédiction pour une demande sous ARIMA (n, d, m)

Soit  $L$  la période qui sépare le temps de passation d'une commande  $O_t$  et la date de sa réception. Pour un modèle ARIMA( $n, d, m$ ) la prédiction de la demande à  $L$  pas est représentée par l'espérance mathématique conditionnelle de la valeur de la demande  $D_{t+L}$  pour la période  $t+L$  (Gilbert, 2004). On la note :

$$\hat{D}_{t+L|t} = E_t(D_{t+L})$$

Si on prend l'équation (12) et on remplace  $t$  par  $t+L$  puis on calcule l'espérance mathématique conditionnelle. Les valeurs des bruits non encore réalisées seront remplacées par des zéros en d'autres termes nous avons  $\hat{\varepsilon}_{t+j} = 0 \quad \forall j > 0$ .

$$D_{t+L} = \underbrace{(\varepsilon_{t+L} + \psi_1 \varepsilon_{t+L-1} + \dots + \psi_{L-1} \varepsilon_{t+1})}_{e_{t+L}} + \underbrace{(\psi_L \varepsilon_t + \psi_{L+1} \varepsilon_{t-L} + \dots)}_{\hat{D}_{t+L|t}} \quad (3.14)$$

### 3.3.3 Représentation du niveau du stock

Sous la politique de commande « Order up to » (Veinott 1965), pour chaque période  $t$  quand un étage reçoit une demande, il détermine son niveau du stock et lance la commande à la fin de cette période. Il recevra cette commande à la période  $t+L$  où  $L$  est le nombre des périodes représentant le délai nécessaire pour la préparation de la commande, la phase de fabrication, et/ou le temps du transport, etc.

$$I_t = I_{t-1} + O_{t-L} - D_t \quad (3.15)$$

Cette équation conserve le niveau du stock pour chaque période. Elle se détermine en fonction de la quantité en stock au début de la période  $t-1$  et la quantité de produit arrivant dans le stock pendant la période  $t-L$ , moins la quantité quittant ce stock pendant

la période  $t$  (voir Figure 3-3) .

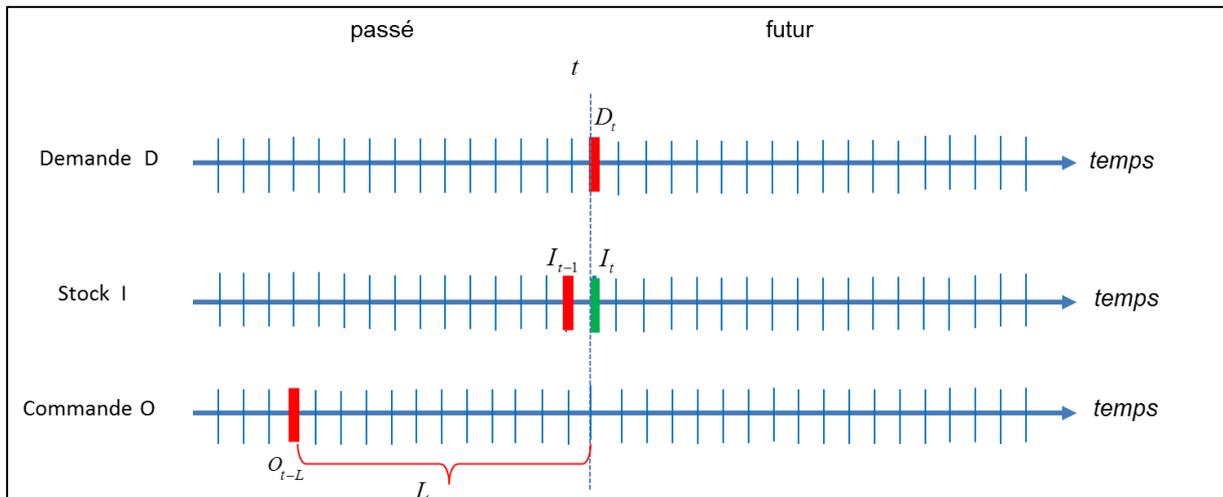


Figure 3-3 : Illustration des paramètres de calcul du stock dans le temps.

D'une façon récursive, l'équation (3.15) s'écrit en fonction des anciennes valeurs du stock et des demandes précédentes avec la représentation suivante du stock.

$$I_t = \sum_{j=0}^{\infty} O_{t-L-j} - \sum_{j=0}^{\infty} D_{t-j}$$

### 3.3.4 Représentation de la commande

Sous la même politique d'approvisionnement « Order up to », la quantité à commander représente la différence entre le niveau du stock  $S$  et la position du stock en cours.

La quantité d'approvisionnement à la date  $t$  est ainsi égale à la valeur du stock de reconstituer  $S$ , moins le niveau du stock à la date  $t$ , plus la somme de la prévision de la demande pour les  $L$  prochaines périodes, moins la quantité des approvisionnements déjà commandés avant  $L-1$  périodes. Ceci est décrit par l'équation suivante.

$$O_t = S - I_t + \hat{D}_{t+1|t} + \dots + \hat{D}_{t+L|t} - O_{t-1} - \dots - O_{t-L+1} \quad (3.16)$$

L'idée est de commander à chaque période afin de garder un niveau du stock équivalent à la valeur  $S$ .

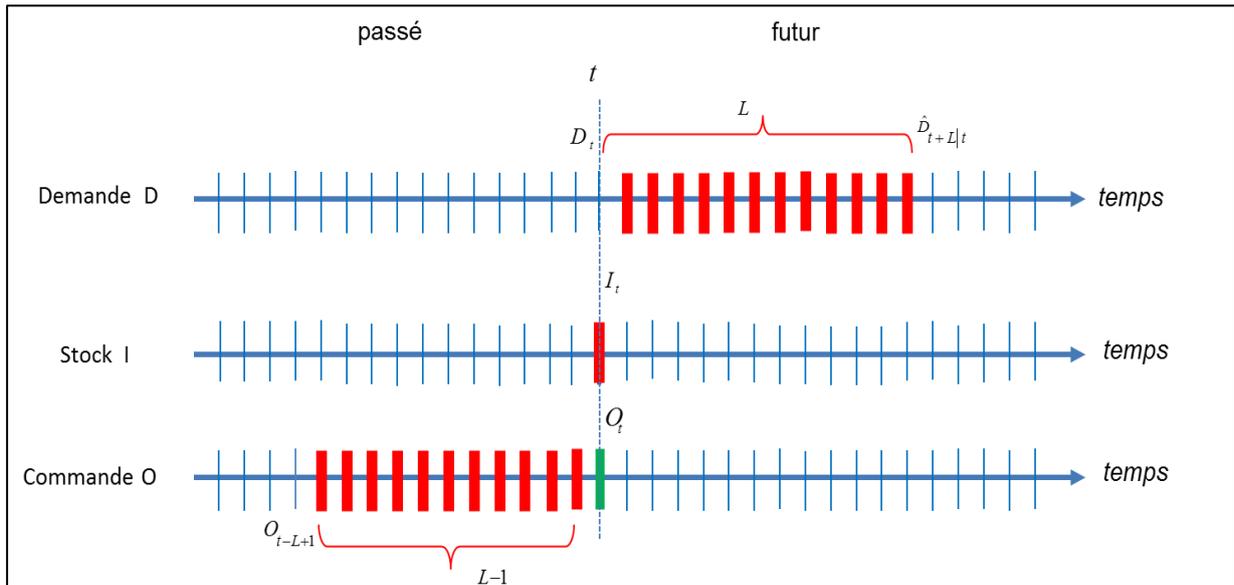


Figure 3-4 : Illustration des paramètres de calcul de la commande dans le temps.

Gilbert (2005) démontre les deux théorèmes suivantes qui permettent d'écrire le niveau du stock  $I_t$  et la quantité à commander  $O_t$  sous forme des modèles ARIMA.

**Théorème 3.1** (Gilbert, 2005)

Le modèle du stock noté  $I_t$  est un ARIMA d'ordre (0,0, L-1) et

$$\begin{aligned}
 I_t = S - \varepsilon_t - \underbrace{(1 + \psi_1)}_{\theta_1^{(I)}} \varepsilon_{t-1} - \underbrace{(1 + \psi_1 + \psi_2)}_{\theta_2^{(I)}} \varepsilon_{t-2} - \dots \\
 - \underbrace{(1 + \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_{L-1})}_{\theta_{L-1}^{(I)}} \varepsilon_{t-L+1}
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

Le modèle du stock est caractérisé par un écart-type  $\sigma$  qui se calcule avec les équations (3.18) et (3.19).

$$\sigma_I = K_I \sigma_\varepsilon
 \tag{3.18}$$

et

$$K_I = \sqrt{1 + (1 + \psi_1)^2 + (1 + \psi_1 + \psi_2)^2 + (1 + \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_L)^2}
 \tag{3.19}$$

L'expression (3.17) peut être facilement retrouvée en partant de l'idée qui indique que la différence entre les niveaux du stock  $I$  et  $T$  est due aux erreurs cumulées des prévisions des demandes à la période  $t-L$ .



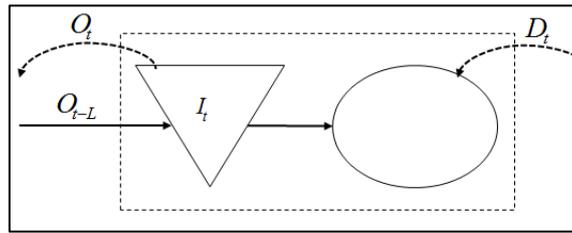


Figure 3-5 : Modèle élémentaire d'une chaîne logistique.

Pour retrouver le modèle de la chaîne entière, nous itérons ce modèle en supposant que la demande  $D_t$  dans un étage en amont n'est que la commande passée par l'étage en aval  $O_t$ .

### 3.3.5 Modélisation d'une chaîne logistique multi-étage

Dans ce qui précède nous avons présenté une modélisation d'un étage d'une chaîne logistique. Nous allons nous baser sur ce modèle élémentaire pour modéliser une chaîne logistique à plusieurs étages, mise en série. La démarche consiste à supposer que la demande pour un étage en amont est égale à la quantité de commande de l'étage en aval. Ainsi, le modèle de la demande à chaque étage est ARMA. On continue à déterminer le modèle du stock et de commande correspondant à chaque étage.

Symboles	Désignations
$i$	Numéro de l'étage
$D_t$	Demande à la période $t$ au niveau de l'étage $i$
$\hat{D}_{t+L t}$	Prévision de la demande pour la période $t+L$ , à partir de la période $t$ , au niveau de l'étage $i$
$\mu$	Constante, moyenne de la demande
$O_t^{(i)}$	La taille de la commande à la période $t$ , au niveau de l'étage $i$
$I_t^{(i)}$	Le niveau du stock à la période $t$ , au niveau de l'étage $i$
$S^{(i)}$	Constante, le niveau de reapprovisionnement du stock
$\varepsilon_t^{(I,i)}$	Le processus de bruit blanc relatif au stock $I$ d'un étage $i$ , à la période $t$ .
$K_I^{(i)}$	Facteur multiplicateur du stock d'un étage $i$
$\varepsilon_t^{(O,i)}$	Le processus de bruit blanc relatif à l'ordre $O$ ( ou la commande lancée par un étage $i-1$ ) à la période $t$ .
$K_O^{(i)}$	Facteur multiplicateur de la commande $O$ lancée par un étage $i$
$L^{(i)}$	Le délai (lead Time) de l'étage $i$
$\sigma_\varepsilon^i$	L'écart type relatif au processus bruit blanc $\varepsilon$ de l'étage $i$ .
$\sigma_I^i$	L'écart type relatif relative au processus du stock $I$ de l'étage $i$ .
$\sigma_O^i$	L'écart type relatif au processus de la commande $O$ de l'étage $i$ .

Tableau 6 : Tableau des notations.

### 3.3.5.1 Calcul des paramètres de l'étage 2

Cet étage va prendre en considération les commandes lancées par ses clients. En d'autres termes la demande  $D_t^{(2)}$  n'est que l'ordre  $O_t^{(1)}$ . Dans ce cas le stock et la commande de l'étage en amont peuvent être modélisés respectivement par les équations (3.24) et (3.25).

$$I_t^{(2)} = S^{(2)} - \varepsilon_t^{(I,2)} - (1 + \psi_1) \varepsilon_{t-1}^{(I,2)} - (1 + \psi_1 + \psi_2) \varepsilon_{t-2}^{(I,2)} - \dots - (1 + \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_{L^{(2)}-1}) \varepsilon_{t-L^{(2)}+1}^{(I,2)} \quad (3.24)$$

$$O_t^{(2)} = \mu + \varepsilon_t^{(O,2)} + \left( \psi_{L^{(2)}+1} / (1 + \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_{L^{(2)}}) \right) \varepsilon_{t-1}^{(O,2)} + \left( \psi_{L^{(2)}+2} / (1 + \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_{L^{(2)}}) \right) \varepsilon_{t-2}^{(O,2)} + \dots \quad (3.25)$$

Le résultat de développement du niveau du stock et de commandes du deuxième étage, permet de déduire la forme des expressions de  $K_I^{(2)}$  et  $K_O^{(2)}$ .

$$K_I^{(2)} = \left( 1 + (1 + \psi_1)^2 + (1 + \psi_1 + \psi_2)^2 + \dots + (1 + \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_{L^{(2)}})^2 \right)^{1/2}$$

$$K_O^{(2)} = 1 + \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_{L^{(2)}}$$

A partir de ces deux dernières expressions nous pouvons généraliser dans le paragraphe suivant le modèle élémentaire.

### 3.3.5.2 Algorithme de généralisation du modèle

On se propose dans ce paragraphe de modéliser une chaîne logistique multi-étages. Nous supposons que la demande est une série temporelle ARMA(n, m) stationnaire. Sous la politique « Order up to », la méthode de représentation d'un étage peut facilement être généralisée pour les autres étages. L'algorithme qui généralise le modèle précédent pour tous les étages de la chaîne logistique consiste à :

1. Prévoir la demande du marché pour le dernier étage
2. Déterminer le stock de l'étage  $i$ 
  - a. Calculer le multiplicateur de la commande à un niveau  $i$
  - b. Calculer la variance du stock
  - c. Calculer le processus des chocs d'erreurs lié au stock pour un niveau  $i$

3. Déterminer la quantité à commander (l'ordre)
  - a. Calculer le multiplicateur de la commande à un niveau  $i$
  - b. Calculer la variance de l'ordre
  - c. Calculer le processus des chocs d'erreurs lié à la commande pour un niveau  $i$
4. S'il y a encore un étage à modéliser, passer à l'étage suivant ( $i=i+1$ )
  - a. Supposer que l'ordre est égal à la demande pour l'étage suivant
  - b. Affecter la valeur de l'écart type de l'ordre relatif de l'étage  $i$ , à la variable qui représente l'écart type du processus bruit blanc  $\varepsilon$  de l'étage  $i+1$
  - c. Revenir à (2)
5. Fin de l'algorithme

### Algorithme de modélisation d'une chaîne logistique

Nous supposons que le dernier étage est d'indice  $i=1$ . A l'aide de nos équations mathématiques l'algorithme s'écrit alors :

Début de l'algorithme

$$D_t = \mu + \varepsilon_t + \psi_1 \varepsilon_{t-1} + \psi_2 \varepsilon_{t-2} + \dots$$

Prévoir la demande au dernier étage

$$\hat{D}_{|t+L} = \psi_L \varepsilon_t + \psi_{L+1} \varepsilon_{t-1} + \dots$$

$i=1$

Répéter

Calculer le multiplicateur du stock à un niveau  $i$

$$K_I^{(i)} = \left[ 1 + (1 + \psi_1)^2 + (1 + \psi_1 + \psi_2)^2 + \dots + (1 + \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_{L(i)})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_I^i = K_I \sigma_\varepsilon^i$$

Calculer le processus des chocs d'erreurs lié au stock pour un niveau  $i$

$$\varepsilon_t^{(I,i)} = K_I^{(i)} \varepsilon_t^{(D,i)}$$

Calculer le multiplicateur de la commande à un niveau  $i$

$$K_O^{(i)} = 1 + \psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_{L^{(i)}}$$

$$\sigma_O^i = K_O \sigma_\varepsilon^i$$

Calculer le processus des chocs d'erreurs lié à la commande pour un niveau  $i$

$$\varepsilon_t^{(O,i)} = K_O^{(i)} \varepsilon_t^{(D,i)}$$

Modèle de l'ordre

$$O^{(i)} = \mu + \varepsilon_t^{(O,i)} + \left( \psi_{L^{(i)+1}} / K_O^{(i)} \right) \varepsilon_{t-1}^{(O,i)} + \left( \psi_{L^{(i)+2}} / K_O^{(i)} \right) \varepsilon_{t-2}^{(O,i)} + \dots$$

Modèle du stock

$$I_t^{(i)} = S^{(i)} - \varepsilon_t^{(I,i)} - (1 + \psi_1) \varepsilon_{t-1}^{(I,i)} - (1 + \psi_1 + \psi_2) \varepsilon_{t-2}^{(I,i)} - \dots \\ - \left( \begin{array}{l} 1 + \psi_1 + \psi_2 + \dots \\ + \psi_{L^{(i)-1}} \end{array} \right) \varepsilon_{t-L^{(i)+1}}^{(I,i)}$$

Si ( $i < \text{nombre d'étages}$ ) alors

$$D_t^{(i+1)} = O_t^{(i)}$$

Fin Si

$$\sigma_\varepsilon^{i+1} = \sigma_O^i$$

$$i = i + 1$$

Jusqu'à ( $i > \text{nombre d'étages}$ )

Fin de l'algorithme

Après avoir écrit l'algorithme de modélisation d'une chaîne logistique à l'aide d'ARIMA, nous relevons dans le tableau suivant une analogie entre le modèle cognitif du domaine élaboré dans le Chapitre 1 et la modélisation d'une chaîne logistique à l'aide d'ARIMA. Le but est de correspondre entre le modèle conceptuel et les spécifications du modèle ARIMA. Dans le cas où une variable du domaine n'est pas prise en compte nous avons inséré le symbole « - ».

Variables du modèle conceptuel			Variables du modèle formel	
Flux	Flux d'information	Information sur le marché	La demande de client : $D_t$	
		Commandes lancées	La taille de la commande : $O_t$	
	Flux physique	Quantité des produits reçus	$R_t = O_{t-L}$ : la quantité des produits reçus à la période $t$ Est supposé égale à la quantité commandée $L$ périodes en avant	
	Flux financier	Prix d'achat	-	
		Prix à la vente	-	
		Prix de revient	-	
Entreprise	Liste de ses fournisseurs		Un seul fournisseur pris en compte	
	Liste de ses clients		Un seul client pris en compte	
	Liste des produits		Un seul produit pris en compte	
	Activité	Approvisionnement	Politique d'approvisionnement	« order up to »
			Niveau de Recomplètement	S
			Capacité de production de fournisseur	Agrégés par le délai $L$ mis entre le lancement et la réception de la commande
			Délai de livraison	
			Temps de passation de commande	
			Capacité maximale du fournisseur	$\overline{OI}$
	Entreposage		-	
	Production	Niveau du stock	Le niveau du stock : $I_t$	
		Capacité maximale du stockage	$\overline{II}$	
	vente		-	
	livraison		-	
	distribution		-	
transmission		-		
Acheminement		-		
Produit	Type des produits		Produits de biens	
	Durée de vie des produits		-	
	Cycle de vie des produits		-	
	Qualité des produits		Indicateur $Z_t$	
	Coût des produits		-	
	Etat de produit (produit fini, composant, matière première, produit intermédiaire)		-	
Chaîne logistique	Structure de la chaîne logistique		Dyadique ou série	
	Type de la chaîne logistique		-	

Tableau 7 : Correspondance entre modèle de domaine et variables du modèle de la chaîne logistique présenté par ARIMA.

**Remarque.** Les variables en couleur bleu seront rajoutées à ce modèle dans les chapitres suivants.

Ce tableau établit une correspondance entre les variables du modèle conceptuel de domaine, et celles du modèle formel d'une chaîne logistique décrite par les modèles ARIMA. Les variables du modèle conceptuel sont obtenues à partir du Chapitre 1, et principalement issues de l'analyse onthologique des définitions ( voir section 1.5). Ce tableau permet de présenter une vision sur les informations du domaine prises en compte par le modèle ARIMA ce qui permet de délimiter la couverture de ce dernier sur le domaine des chaînes logistique.

## **3.4 Etude des vulnérabilités des chaînes logistiques à partir des modèles ARMA**

### **3.4.1 Présentation du problème l'effet Bullwhip**

Les marchés d'aujourd'hui sont caractérisés par une variation de la demande qui est d'une nature aléatoire et non stationnaire. Les entreprises font constamment face à l'incertitude de la demande des clients finaux. Chaque partenaire de la chaîne logistique en amont produit selon sa prévision basée sur les commandes lancées par ses partenaires situés en aval. En d'autres termes chaque membre utilise les informations qui concernent les demandes les plus récentes pour ajuster les quantités à commander auprès de son fournisseur. En passant ces informations aux étages en amont, les membres d'une chaîne logistique s'engagent à accepter un stock supplémentaire, à avoir un réserve de sécurité, à prévoir une capacité de production suffisante et des heures supplémentaires , et à planifier le transport et le délai de livraison.

La variabilité de la demande d'un client pousse l'entreprise à s'approvisionner d'une quantité plus importante et donc à constituer un niveau du stock plus haut. L'augmentation ou la variation de la demande affecte les quantités à commander du coté de ses fournisseurs et détermineraient à son tour le délai de livraison des produits. Donc, les variations de la demande seront amplifiées et remontées tout le long d'une chaîne logique. Du fait que les entreprises en aval ont une vision plus claire sur le marché, les fluctuations sont plus fortes au niveau des entreprises qui se trouvent en amont de la chaîne logistique. Ce phénomène est connu sous le nom de « effet de coup de fouet » ou encore en anglais « the bullwhip effect ».

A partir du jeu de la bière, Sterman (1989) conclut que des décisions irrationnelles mènent à l'effet bullwhip. En revanche, Lee et al. (1997) démontrent que même avec des actions raisonnables, les entreprises aboutissent toujours à l'effet bullwhip. Ils ont identifié quatre facteurs majeurs causant l'effet bullwhip :

1. Le premier facteur concerne la mise à jour des prévisions de la demande qui se base sur les informations passées à partir de l'étage en aval et pas forcément du client final.
2. Le deuxième facteur est relatif à la taille du groupement des commandes en lot. Ce groupement est souvent utilisé pour minimiser les coûts de fabrication et de transport.
3. Le troisième est lié à l'anticipation des facteurs des pénuries.
4. Le quatrième facteur est lié à la variabilité des prix.

Pour ce faire, Lee et al. (1997) ont utilisé des modèles mathématiques et montrent qu'avec un simple étage, et sous l'hypothèse que la demande est AR (1) et un délai égal à une période, la variation de la commande excède la variation de la demande. L'effet coup de fouet est mesuré par échelon par la formule (3.26). Dans la même référence les auteurs ont également proposé les actions qui peuvent être adoptées pour atténuer l'impact de ces quatre sources de l'effet bullwhip.

$$BWE = \frac{\sigma(O(t, t+T))}{\sigma(D(t, t+T))} \quad (3.26)$$

Selon Gilbert (2005) l'effet bullwhip représente l'amplification de la variance de l'ordre et du stock de l'aval vers l'amont dans une chaîne logistique. A l'aide de la modélisation d'une chaîne logistique avec ARIMA et à partir des Théorèmes 1 et 2, il représente l'effet de coup de fouet en déterminant les rapports des écarts-types donnés par les expressions (3.18) et (3.22). On distingue alors l'effet bullwhip relatif au stock  $K_I$  (équation (3.19)) et l'effet bullwhip relatif à la commande  $K_O$  ( voir équation (3.23)).

$K_I$  et  $K_O$  s'écrivent en fonction du délai  $L$  et des paramètres régressifs du modèle de la demande. Ainsi, l'effet coup de fouet ne dépend pas du nombre d'étages de la chaîne logistique Gilbert (2005).

Au niveau de flux de matières, les perturbations sur les prix des matières premières génèrent variations des fournisseurs de prix aux producteurs et de producteurs aux clients. Childerhouse et al. (2008) établissent le lien de cause à effet, entre l'instabilité des programmes de production prévisionnels et les phénomènes d'oscillations croissantes générés en conséquence le long de la chaîne logistique amont dans l'industrie automobile.

Puisque la communauté de recherche distingue entre les risques opérationnel et le risque de perturbation, Ivanov et al. (2014) proposent de distinguer entre ces deux concepts et considèrent que le « ripple effect » est pour les risques perturbateurs, et le bullwhip pour les risques opérationnels.

### 3.4.2 Simulation de l'effet Bullwhip

Dans ce qui suit, nous allons simuler l'effet bullwhip pour deux étages. Nous supposons que les prévisions de la demande n'est pas pris en compte au niveau de planification. Ainsi, pour chaque période, la quantité d'ordre est égale exactement à la demande de la période courante. Nous considérons également que le délai de la commande est fixe.

Nous proposons de simuler l'évolution de l'effet bullwhip, en prenant comme exemple une demande ARIMA (0,1,1) d'une moyenne  $\mu=662$  et d'écart type  $\sigma=229,3$ . Cet exemple est pris d'un cas réel et le processus est identifié à l'aide de Matlab. L'évolution de la dynamique de la demande est donnée par la figure suivante :

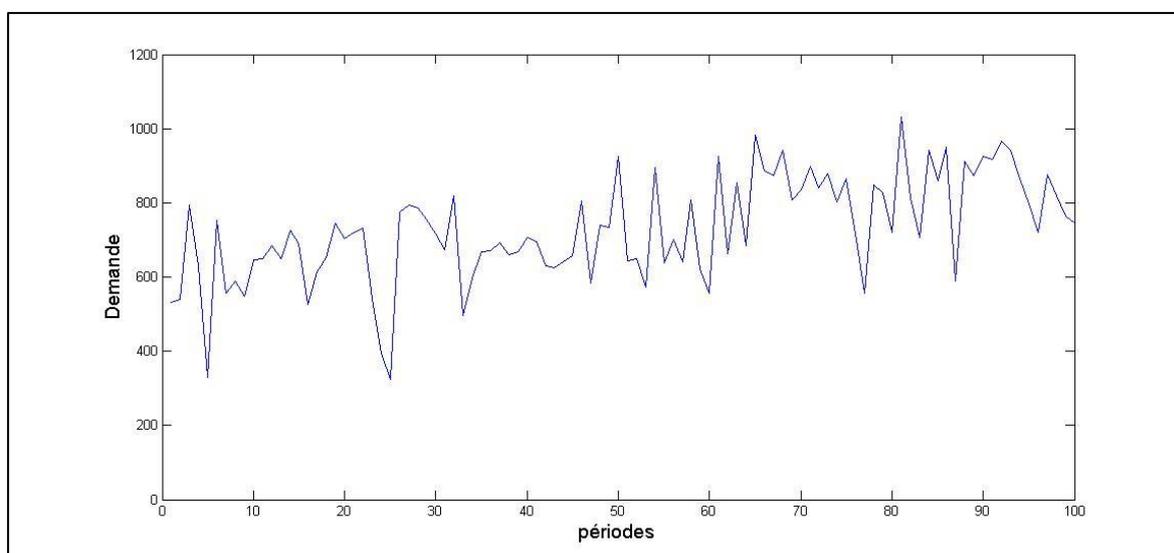


Figure 3-6 : Dynamique de la demande ARIMA (0,1,1).

Dans la Figure 3-6 nous pouvons voir que la série temporelle relative à la demande est non stationnaire (on distingue une tendance à la hausse). Le producteur et son fournisseur ont un manque d'information et n'ont pas une visibilité sur le marché. L'effet bullwhip résultant sur le stock des deux étages est illustré par la Figure 3-7 et celui sur les commandes est donné par la Figure 3-8.

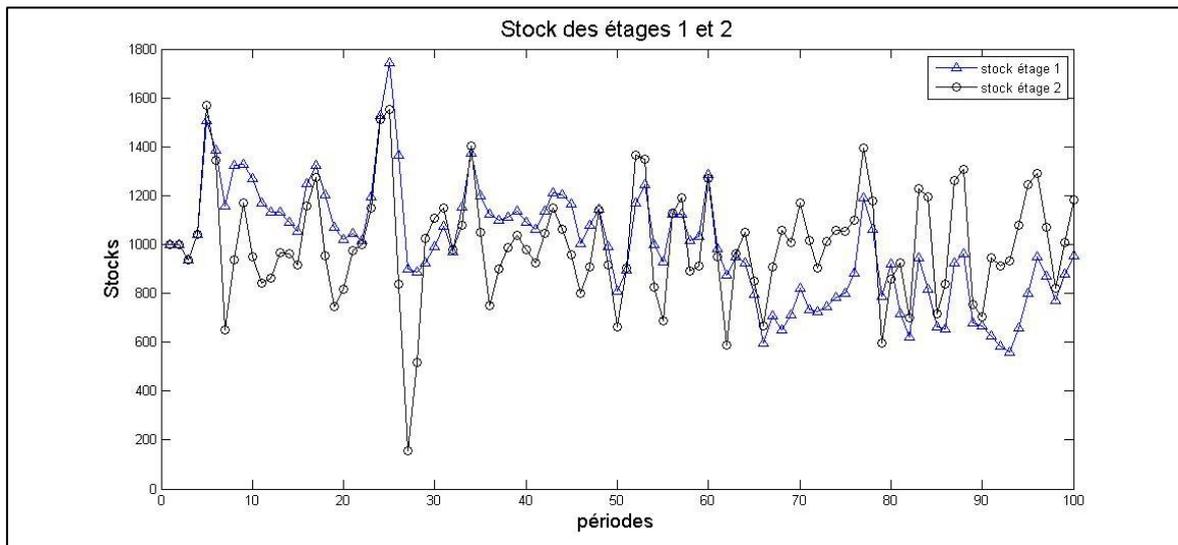


Figure 3-7 : Simulation des stocks relatifs aux étages 1 et 2.

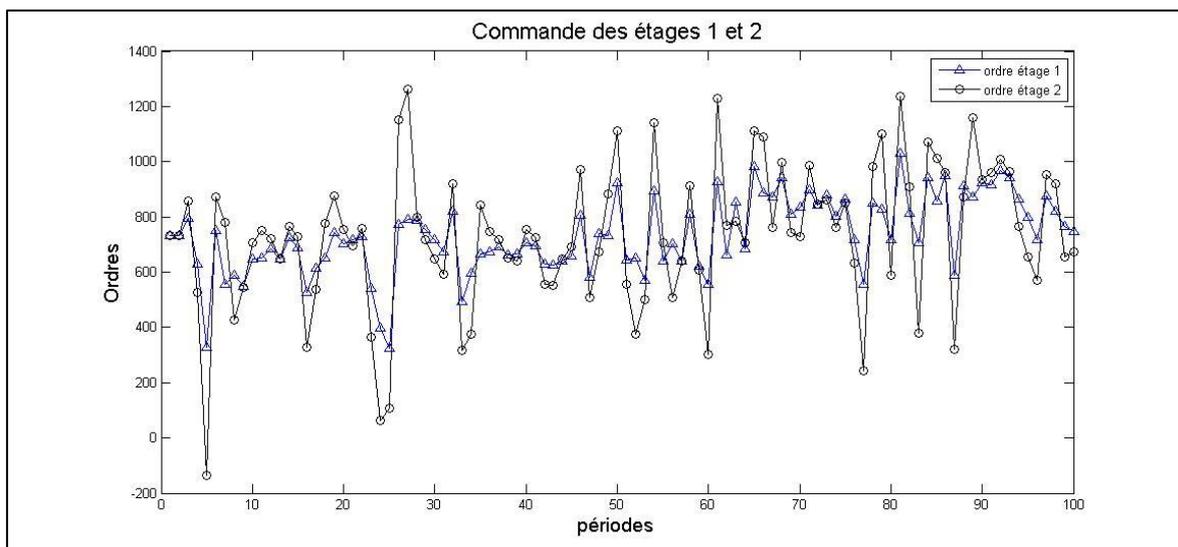


Figure 3-8 : Simulation des commandes lancées par les étages 1 et 2.

La simulation montre que les petites variations de la demande des clients se traduisent par des pics modérés dans les niveaux des stocks et les commandes de l'étage en amont (étage 1), ce qui crée encore de plus grands pics dans les niveaux des stocks et les commandes de l'étage 2. Avec des fortes perturbations l'effet bullwhip peut représenter une vulnérabilité à la chaîne. Cette simulation met l'accent sur l'importance de l'effet de bullwhip si une entreprise ne prend pas en compte les informations concernant les anciennes valeurs de la demande.

## 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'un maillon d'une chaîne logistique à l'aide de modèles ARIMA.

Nous avons également écrit l'algorithme qui permet d'avoir un modèle de la chaîne entière. Ce modèle proposé par Gilbert (2005) prend en compte l'incertitude liée à la demande. Une évaluation de la vulnérabilité liée à l'effet bullwhip, mesurant l'amplification des variances du stock et de commande due à la perturbation de la demande, a été déduite de ce modèle.

Ce modèle permet ainsi d'intégrer des perturbations faibles dues aux bruits blanc qui sont relativement négligeables par rapport aux fortes perturbations ou des ruptures auxquelles les chaînes logistiques peuvent être confrontées

Le modèle tel que présenté ci-dessus, ne prend pas en compte des contraintes telles que la capacité maximale de stockage ou celle de fournisseur. Nous proposons dans le chapitre suivant d'intégrer ces capacités dans notre modèle, et de proposer des indicateurs permettant d'étudier sa vulnérabilité face à des phénomènes dangereux.



# Chapitre 4. Modélisation d'une chaîne logistique à l'aide des modèles ARIMA sous contraintes

## 4.1 Introduction

Notre objectif de recherche est l'évaluation des risques et des vulnérabilités dans les chaînes logistiques à l'aide des indicateurs de vulnérabilités tout en poursuivant la dynamique de la chaîne. Nous avons choisi de travailler avec les modèles ARIMA pour modéliser une chaîne logistique multi-étages. Comme nous avons vu dans le chapitre précédent, cette modélisation présente la chaîne à travers le flux d'information et le flux physique échangés par les différents étages ainsi que le niveau du stock dans chaque étage. Ce modèle prend en considération, la dynamique de ces flux qui sont visiblement dépendants. Il prend en compte en particulier l'incertitude liée à la demande, et ses répercussions sur le stock et sur les commandes sous forme de l'effet coup de fouet.

Il se trouve que cette modélisation ne prend pas en compte des contraintes sur les niveaux de production et du stockage et sur les bilans commerciaux des entreprises qui forment la chaîne logistique (par exemples rendement machine et capacité de production, capacité du stockage, limite de budget ou capacité d'achat, limite de contrat etc.). Nous proposons dans ce chapitre d'étendre ce modèle pour prendre en considération ces contraintes.

Tant que les différents processus ARIMA modélisant une chaîne logistique (Demande, Commande, et Stock) évoluent en respectant les contraintes de chaque étage de la chaîne logistique, des fluctuations se transmettent au système à travers des variations des niveaux de production et du stockage. Dès qu'une de ces contraintes n'est pas respectée, dû à des événements dangereux ou de fortes perturbations, le système peut s'écarter fortement de sa dynamique nominale et même devenir instable.

Dans tel cas, il faut d'abord ajuster la dynamique de système pour que le modèle soit plus réaliste. Ensuite sur une fenêtre d'observation glissante  $d$ , nous déterminons la moyenne glissante de nombre de fois un état de déséquilibre est recensé, dans le but de proposer des indicateurs de vulnérabilités. Nous avons besoins ainsi des indices pour indiquer les cas de dépassement des contraintes au fur de l'évolution des différents processus (le processus du stock  $I_t$  ou le processus de la commande  $O_t$ ).

Nous commençons ce chapitre par la modélisation de la chaîne logistique à l'aide d'ARIMA sous contraintes (4.2). Après une description du problème avec contraintes, nous définissons les contraintes de capacités (§4.2.3.2) et les contraintes de positivités (§ 4.2.3.3). La première partie de ce chapitre est suivie d'une étude numérique qui compare entre le modèle d'une chaîne logistique mono-étage, sans et avec la prise en compte de ces contraintes sera présentée l'aide de la simulation.

Dans la section (4.3) nous proposons des indices est des indicateurs de vulnérabilité. Nos indicateurs de vulnérabilité seront principalement inspirés des indicateurs de performances. Nous allons reprendre l'exemple de la section (4.2) pour simuler les indicateurs proposés.

## **4.2 Présentation de la chaîne avec ARIMA sous contraintes**

### **4.2.1 Description du problème avec contraintes**

Le comportement stationnaire d'un modèle d'ARIMA, utilisé pour la représentation d'une chaîne logistique, est valable seulement sous les conditions de fonctionnement appartenant strictement au domaine des contraintes opérationnelles et économiques. Particulièrement, les contraintes de production et du stockage doivent être respectées par chacune des entreprises partenaires. En effet, dans des cas réels, chaque entreprise possède, d'une part, une capacité du stockage limitée, d'autre part cette même entreprise ne peut ni dépasser son budget pour commander, ni demander plus que la quantité maximale de produits dont son fournisseur dispose.

En outre, le niveau du stock et la quantité des produits livrés ne peuvent pas avoir des valeurs négatives.

Pour élargir le domaine de validité du modèle présenté dans le chapitre précédent, nous proposons dans la section suivante d'intégrer des contraintes de capacités et de positivités, d'une part, pour se rapprocher de la réalité, d'autre part, pour étudier le comportement du système quand une ou plusieurs entreprises dépassent leurs contraintes et entrent dans un état de déséquilibre à partir duquel la satisfaction de son client n'est pas forcément établie.

Nous rappelons que la modélisation de la chaîne donnée par la représentation de la demande, le niveau du stock de chaque étage et la quantité de produits ou de composants à commander sous forme ARIMA est linéaire. Les contraintes de saturation peuvent être présentées analytiquement par des modèles avec des termes non-linéaires.

## 4.2.2 Formulation mathématique

La modélisation du problème ARIMA avec contraintes se base sur les hypothèses suivantes :

- Les étages de la chaîne logistique sont mis en série.
- A chaque étage, le délai d'approvisionnement en composants ou produits intermédiaires est supposé fixe et connu. Ce délai couvre le temps de passation de la commande, le délai de production (dans le cas d'une production à la demande) et le délai de livraison. De façon générique, le délai d'approvisionnement est noté  $L$ .
- Si une partie de demande n'est pas servie, elle serait considérée comme une demande différée (connue dans la littérature anglo-saxonne par le terme « backorder »).
- Tous les calculs du stock et de la commande se font à la fin de chaque période de planification  $t$ .

## 4.2.3 Modélisation des chaînes logistiques par le modèle ARIMA avec contraintes

Dans cette section nous allons intégrer les contraintes dans le modèle décrit dans le chapitre précédent. Pour la compréhension du nouveau modèle, nous fournissons d'abord la notation que nous allons utiliser. Dans un deuxième temps, nous présentons successivement les contraintes de capacité puis les contraintes de positivité.

### 4.2.3.1 Notations

Afin de décrire le modèle mathématique ARIMA sous contraintes d'un étage d'une chaîne logistique, nous utilisons les notations suivantes du Tableau 8 :

Symboles	Désignations
<b>Les paramètres</b>	
$D_t$	Demande à la période $t$
$J_t$	Le niveau réel du stock à la période $t$
$I_t$	Le niveau du stock calculé sans contraintes à la période $t$
$O_t$	La quantité de commande calculée sans contraintes à la période $t$
$\Omega_t$	La quantité réelle de commande à la période $t$
$B_t$	la quantité des livraisons différée « backorder » à la période $t$
$S$	Constante, le niveau de recomplètement du stock

Les contraintes	
$\bar{II}$	La capacité maximale du stockage
$\bar{OI}$	La capacité maximale du fournisseur

Tableau 8 : Table des notations du modèle sous contraintes

### 4.2.3.2 Contraintes de capacités

Les contraintes de capacités dans une chaîne logistique expriment la restriction des capacités des ressources des entreprises qui le forment. Dans ce travail, nous nous intéressons en particulier, à la quantité des produits qu'elle dispose dans son espace du stockage et la disponibilité des produits chez le fournisseur d'une entreprise donnée.

- **Contrainte de capacité du stockage.**

Au niveau de la planification, les gestionnaires prennent en compte la capacité du stockage des produits avant la phase de fabrication. En effet, une entreprise est aussi limitée par rapport à son espace du stockage. Le niveau des produits à stocker ne doit pas dépasser cette capacité, ici  $\bar{II}$ .

Dès que la valeur du niveau du stock calculée dépasse cette limite, seule la capacité maximale du stockage sera prise en compte dans le modèle. Soit  $J_t$  le niveau du stock réel à la date  $t$ . En prenant en compte cette contrainte, le niveau du stock réel devient alors:

$$\begin{cases} J_t = I_t & \text{si } I_t < \bar{II} \\ J_t = \bar{II} & \text{si } I_t \geq \bar{II} \end{cases} \quad \forall t \quad (4.1)$$

Cette contrainte assure que, pour chaque période  $t$ , l'espace occupé par tous les produits stockés est inférieur à ou égal à l'espace disponible pour le stockage.

- **Contrainte de capacité du fournisseur.**

Cette contrainte concerne le respect des capacités des fournisseurs. En effet, dans certains cas, une entreprise peut rencontrer des problèmes durant la phase d'approvisionnement en matières premières ou en produits semi-fini. Outre le cas de pénurie de ces matières, une entreprise peut se retrouver limitée par rapport à la quantité des produits à approvisionner auprès de son ou ses fournisseurs. Par exemple, dans les cas de très forte demande, les fournisseurs ne peuvent pas délivrer suffisamment de produits ou de matières nécessaires à l'étage en aval pour une période donnée.

Nous supposons qu'une entreprise a besoin de commander une quantité  $O_t$  pour la

période  $t$ , et que cette entreprise se situe en aval d'un fournisseur dont la capacité maximale est  $\overline{OI}$ .

La quantité à commander  $O_t$  sera satisfaite si elle est inférieure à la capacité maximale du fournisseur  $\overline{OI}$ , sinon la demande ne sera pas totalement satisfaite et dans ce cas seulement la quantité maximale que peut assurer le fournisseur serait prise en compte dans le modèle. La quantité réelle des matières premières ou des produits semi-fini, qu'une entreprise peut procurer, et qu'on notera  $\Omega_t$ , sera déterminée de la façon suivante :

$$\begin{cases} \Omega_t = O_t & \text{si } O_t < \overline{OI} \\ \Omega_t = \overline{OI} & \text{si } O_t \geq \overline{OI} \end{cases} \quad \forall t \quad (4.2)$$

#### 4.2.3.3 Contraintes de positivité

Outre les contraintes de capacités, nous proposons d'intégrer dans le modèle des contraintes de positivités. Ces contraintes assurent que le niveau du stock et la quantité à commander sont positifs ou nuls.

- **Contrainte de positivité du stock.**

Avoir un niveau du stock négatif semble sans signification physique. Toutefois, le cas où le stock est négatif peut s'expliquer par des demandes différées, ou « backorder » en anglais. En d'autres termes, une ou plusieurs commandes ne peuvent pas être satisfaites immédiatement, et que le client est prêt à attendre pendant un certain temps.

Le pourcentage d'articles en attente et le nombre de périodes de commandes en retard sont des mesures importantes de la qualité de service d'une entreprise et de l'efficacité de sa gestion des stocks. Si nous notons  $B_t$  la quantité de « backorder » à la période  $t$ , le système d'équations (4.3) concernant le modèle du stock deviendrait :

$$\begin{cases} J_t = 0 \text{ et } B_t = -I_t & \text{si } I_t \leq 0 \\ J_t = I_t & \text{si } 0 \leq I_t < \overline{II} \\ J_t = \overline{II} & \text{si } I_t \geq \overline{II} \end{cases} \quad \forall t \quad (4.3)$$

- **Contrainte de positivité de commande.**

Commander une quantité négative n'a pas de sens physique si on écarte la possibilité de retourner des marchandises. Ainsi, la quantité à commander ne pouvant pas être

négative et la commande réelle  $\Omega_t$  s'écrira comme suit :

$$\begin{cases} \Omega_t = 0 & \text{si } O_t \leq 0 \\ \Omega_t = O_t & \text{si } 0 < O_t < \overline{OI} \quad \forall t \\ \Omega_t = \overline{OI} & \text{si } O_t \geq \overline{OI} \end{cases} \quad (4.4)$$

En résumé la modélisation d'un étage d'une chaîne logistique sous contraintes à l'aide d'ARIMA, avec prise en compte des livraisons différées, est formulée comme suit :

### 1. La demande $D_t$

$$D_t = \mu + \sum_{i=1}^n \phi_i (D_{t-i} - \mu) + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^m \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (4.5)$$

### 2. Le stock $I_t$

$$I_t = J_{t+1} + \Omega_{t-L} - D_t - B_{t-1} \quad (4.6)$$

Avec

$$\begin{cases} J_t = 0 \text{ et } B_t = -I_t & \text{si } I_t \leq 0 \\ J_t = I_t & \text{si } 0 \leq I_t < \overline{II} \\ J_t = \overline{II} & \text{si } I_t \geq \overline{II} \end{cases} \quad \forall t \quad (4.7)$$

### 3. La commande $O_t$

$$O_t = S - I_t + \hat{D}_t(1) + \dots + B_t + \hat{D}_t(L) - \Omega_{t-1} - \dots - \Omega_{t-L+1} \quad (4.8)$$

Avec

$$\begin{cases} \Omega_t = 0 & \text{si } O_t \leq 0 \\ \Omega_t = O_t & \text{si } 0 < O_t < \overline{OI} \quad \forall t \\ \Omega_t = \overline{OI} & \text{si } O_t \geq \overline{OI} \end{cases} \quad (4.9)$$

En reflétant d'une manière la plus fidèle notre champ d'application, ce modèle n'est plus linéaire. Pour étudier le comportement d'une chaîne multi-étages mise en série nous allons nous servir de la simulation pour, d'une part, surmonter le problème de la complexité du modèle analytique et d'autre part, pour observer le comportement du système. Comme le cas du modèle ARIMA sans contraintes proposé dans le Chapitre 3, nous allons supposer que la commande d'un étage, servira comme la demande de l'étage

en amont.

## 4.2.4 Simulation d'une chaîne logistique à l'aide d'ARIMA sous contraintes

Après avoir introduit le modèle d'une chaîne logistique sous contraintes, nous proposons de faire une simulation comparative entre un exemple d'une chaîne à un étage sans et avec contraintes de capacités et de positivités.

### 4.2.4.1 Description de l'exemple Numérique

Nous supposons qu'on dispose d'une chaîne composée d'un client et de son fournisseur.

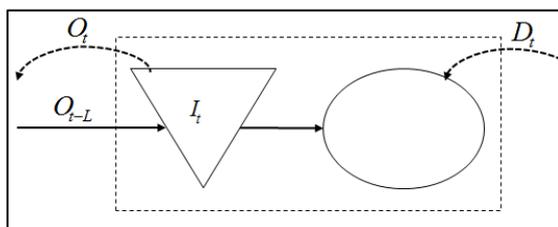


Figure 4-1: Modèle mono-étage.

Supposons que la demande reçue est incertaine et vérifie le modèle AR suivant :

$$D_t = 0,5 D_{t-1} + 0,5 D_{t-2} + \varepsilon_t$$

$\varepsilon_t$  est un bruit blanc gaussien de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2=5$ . L'allure de la demande est montrée par la figure (4.2).

A cet étage on suit la politique d'ordre « order up to », avec laquelle, et pour chaque période  $t$ , on met à jour la valeur du niveau du stock, et on calcule la quantité à commander à l'instant  $t$  et qui va être reçue à la période  $t+L$ , de telle sorte, on ramène le niveau du stock à un niveau de recombplètement  $T=45$ . Le délai  $L$  est supposé constant égal à 3.

Au niveau du dernier étage, la demande n'est pas connue au préalable, elle est évaluée en fonction de ses deux dernières valeurs. A partir de la date  $t$ , les prévisions des demandes en fonction de la demande réelle  $D_t$  peuvent être déterminées d'une façon récursive comme suit :

$$\begin{cases} \hat{D}_{t+1|t} = 0.5D_t + 0.5D_{t-1} \\ \hat{D}_{t+2|t} = 0.75D_t + 0.25D_{t-1} \\ \hat{D}_{t+3|t} = 0.625D_t + 0.375D_{t-1} \end{cases}$$

Au niveau d'un étage et avant de lancer ses commandes auprès de son fournisseur, on évalue le niveau du stock.

Pour cette étude comparative, deux modèles sont envisagés.

**Modèle sans contraintes.** Le premier modèle ne prend pas en compte des contraintes. Le niveau du stock et les commandes lancées sont respectivement calculés à l'aide de l'équation (3.15), respectivement de l'équation (3.16).

**Modèle avec contraintes.** La simulation de deuxième modèle sera avec la prise en compte des contraintes. Dans ce cas, le niveau du stock et la quantité des commandes lancées, sont calculés respectivement à l'aide des équations (4.6) et l'équation (4.8) et sont respectivement ajustés à l'aide des expressions (4.7) et (4.9). Les valeurs numériques choisies pour les contraintes sont :  $\overline{II} = 45$ , et  $\overline{OI} = 55$  ;

#### 4.2.4.2 Résultats de simulation pour des perturbations de la demande

Les simulations de la dynamique des deux modèles sont réalisées sur Matlab. Nous commençons par simuler la série de la demande  $D_t$  et la série des prédictions de la demande  $\hat{D}_t$ . Ces deux séries seront utilisées pour le premier et le deuxième modèle afin de voir la différence entre comportement de la chaîne logistique sans, et avec la prise en compte des contraintes. Nous simulons les deux modèles sur une plage de 500 périodes.

Le résultat de la simulation de demande est illustré par la Figure (4.2).

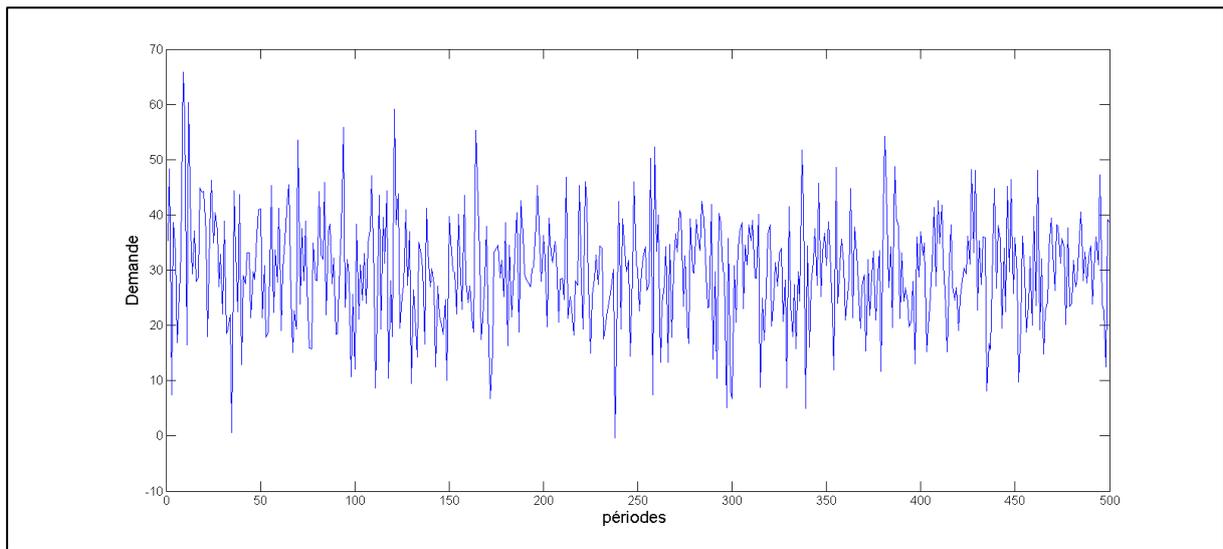


Figure 4-2 : Evolution de la demande réelle.

Selon la figure 4.3, qui présente l'évolution des prédictions, les prévisions sur les demandes suivent bien l'évolution de la demande réelle.

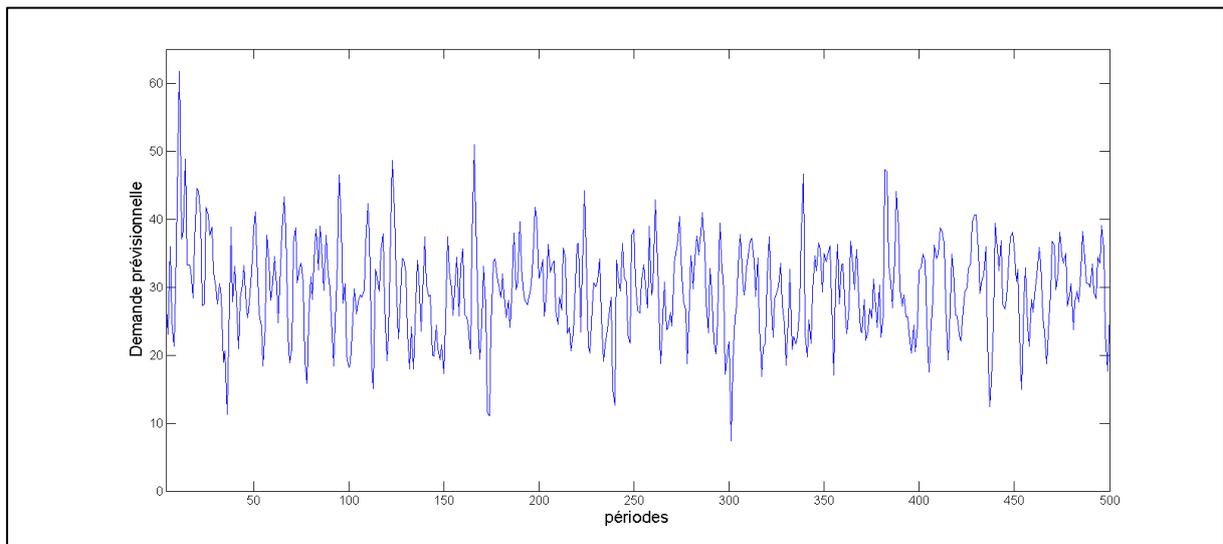


Figure 4-3 : Prédiction de la demande.

### **Modèle sans contraintes.**

A ce niveau, nous nous intéressons à l'évolution de niveau du stock et des commandes dans le temps. A partir des Figures (4.4) et (4.5) les séries relatives au stock et à la commande sont visiblement stationnaires.

Nous remarquons dans la Figure (4.4) que pour certaines périodes, la valeur du stock est assez élevée. Notamment les périodes 8, 160, 72, 308 et 443, le niveau du stock

dépasse la valeur 70. Ces valeurs sont relativement grandes par rapport à l'objectif de l'entreprise, qui a pour but de ramener le stock au niveau de reapprovisionnement  $S=40$ .

De même nous pouvons constater l'existence des valeurs négatives du stock pour certaines périodes comme celui le cas pour la période.

Nous faisons la même constatation pour la série des commandes où les quantités de commandées dépassent la valeur 80 pour les périodes 440 et 486 et prennent des valeurs négatives pour les périodes 20, 71 ou encore la période 206.

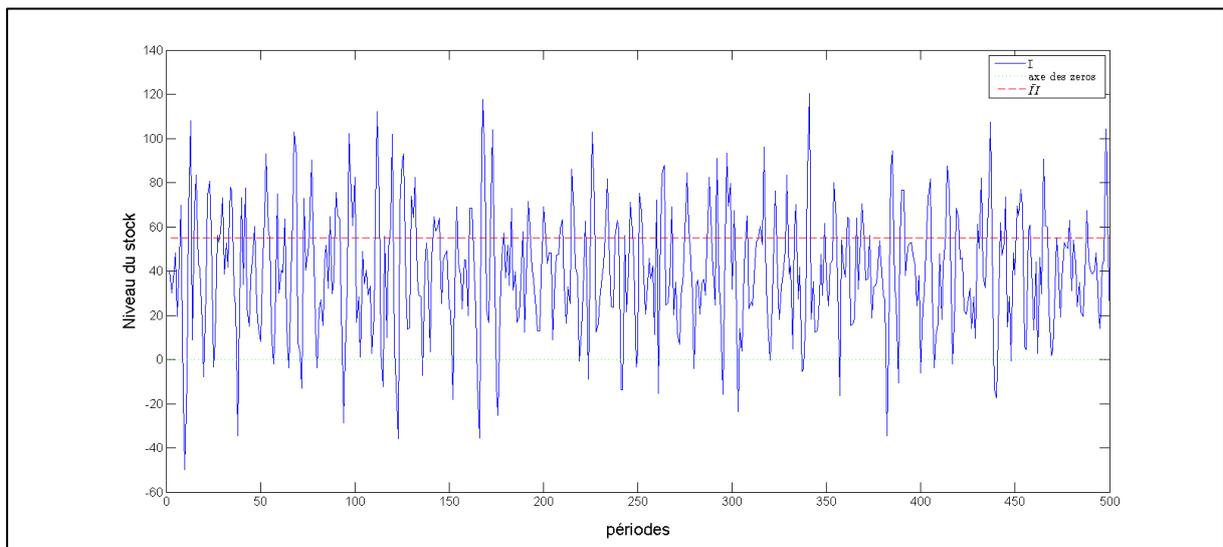


Figure 4-4 : Niveau du stock sans prise en compte des contraintes.

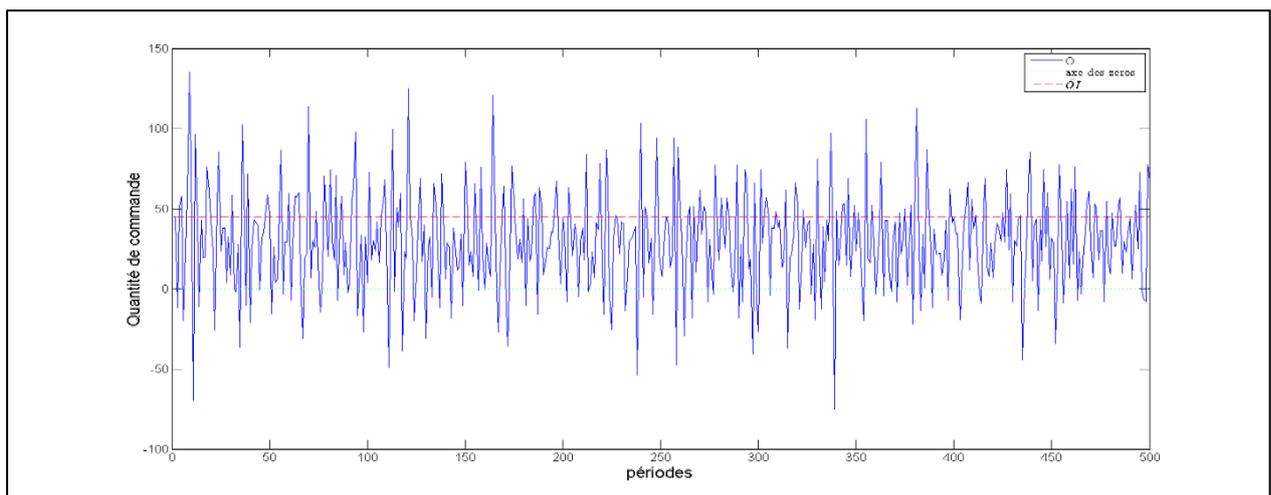


Figure 4-5 : Quantité des commandes sans la prise en compte des contraintes.

### Modèle sous contraintes.

Les résultats de simulation sous contraintes sont présentés par les figures (4.6) et (4.7). Ces figures montrent que, durant l'évolution du stock et de commandes dans le temps de simulation, le niveau du stock est toujours bornés entre zéro et la valeur maximale du stockage=55 et que le niveau de commandes est toujours entre zéro et la capacité maximale de fournisseur=45.

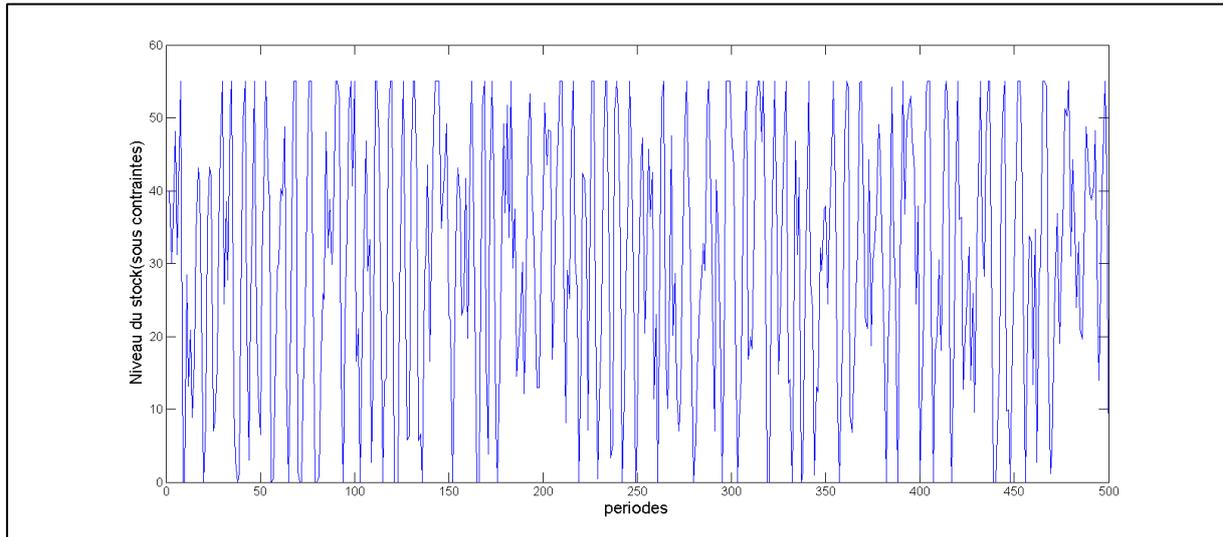


Figure 4-6 : Niveau du stock avec la prise en compte des contraintes.

Le niveau du stock semble atteindre sa limite de stockage et il touche fréquemment la valeur maximale du stockage qui est égale à 45. Le système se trouve ainsi fréquemment dans le cas de saturation du stockage (over-stock).

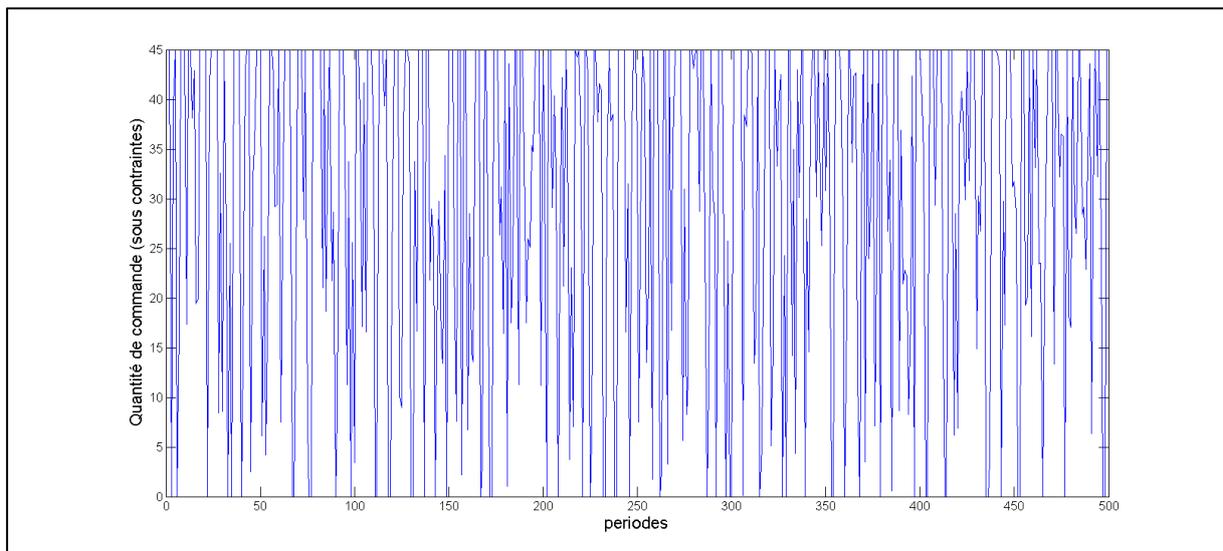


Figure 4-7 : Quantité des commandes avec la prise en compte des contraintes.

## 4.3 Définition des Indices et des indicateurs de vulnérabilités

Dans la section précédente nous avons présenté le modèle ARIMA sous contraintes. Comme nous venons de voir, ce modèle permet d'étudier le comportement réel d'une chaîne logistique et des éventuels dysfonctionnements ou déséquilibre. La question qui se pose maintenant est « comment modéliser la vulnérabilité d'une chaîne logistique ? ».

L'étude de la vulnérabilité de système face à un évènement indésirable s'impose quand la chaîne logistique est déviée par rapport à ses objectifs (fiabilité, réactivité, etc. (voir Tableau 2)).

En mode de fonctionnement stationnaire, c'est à dire entre les bornes des contraintes de capacités et de positivités précédemment définis, les fluctuations se transmettent au système à travers des variations des niveaux de production et du stockage. Dès qu'on passe en mode fluctuant en touchant les bornes (dû à la perturbation des flux par exemple), une chaîne logistique devient fragile. Pour mesurer cette fragilité, nous avons jugé important de présenter plusieurs indicateurs qui sont principalement inspirés des indicateurs de performances proposés par le modèle SCOR (voir 3.3.2). Pour ce faire nous avons besoin en premier lieu de ce qu'on appellera des indices de suivi, indiquant les périodes où un étage d'une chaîne logistique atteint ses limites.

### 4.3.1 Définition des Indices

Si un processus enregistre des valeurs extrêmes, c'est-à-dire en cas de butée sur les contraintes précédemment définies, une entreprise peut se retrouver dans un état de déséquilibre. Afin de suivre la dynamique du système, notamment en ce qui concerne la saturation des contraintes, nous proposons de définir pour chaque étages de la chaîne deux indices : (i) un indice relatif au stock, (ii) et un indice relatif à la commande.

Les indices	
$II_t$	Indice du stock à la date à la période t
$OI_t$	Indice de la commande à la période t

Tableau 9 : Table complémentaire de notations : les indices.

Nous définissons tout d'abord un indice relatif au stock  $II_t$  (comme Inventory index) qui vaut  $-1$  à chaque période  $t$  où le niveau du stock calculé  $I_t$  est négatif, et qui prend la valeur  $+1$  quand le niveau du stock dépasse la capacité du stockage  $\bar{I}$ . Pour les autres cas il est mis à zéro.

De la même façon nous définissons un indice relatif à la commande  $OI_t$  (comme Order index). Nous proposons que l'indice  $OI_t$  vaille zéro si on ne touche pas les bornes du modèle. A une période  $t$ , cet indice est à  $+1$  quand la quantité que l'on souhaite commander dépasse la valeur de la capacité du fournisseur, la valeur décrite dans contrat ou la capacité d'achat. La valeur  $-1$  de cet indice correspond au cas où la quantité que l'on souhaite commander à la période  $t$  est négative. Dans cette thèse nous ne considérons que la capacité maximale de fournisseur comme une limite d'approvisionnement.

Les indicateurs  $II_t$  et  $OI_t$  sont toujours à zéro quand on ne touche pas les niveaux des contraintes précédemment définies. C'est comme une sorte de « flag » qui permet de poursuivre l'état du système au cours de la planification des commandes et qui s'enlève avec une valeur  $+1$  ou  $-1$ , bien évidemment selon le cas, dès qu'on dépasse les contraintes.

Les relations couplant les modèles du stock et de commande, les indices peuvent alors s'écrire ainsi :

$$\begin{cases} J_t = 0 & B_t = -I_t \text{ et } II_t = -1 \text{ si } I_t \leq 0 \\ J_t = I_k & \text{et } II_t = 0 \text{ si } 0 \leq I_t < \overline{II} \\ J_t = \overline{II} & \text{et } II_t = 1 \text{ si } I_t \geq \overline{II} \end{cases} \quad (4.10)$$

et

$$\begin{cases} \Omega_t = 0 & \text{et } OI_t = -1 \text{ si } O_t \leq 0 \\ \Omega_t = O_k & \text{et } OI_t = 0 \text{ si } 0 \leq O_t < \overline{OI} \\ \Omega_t = \overline{OI} & \text{et } OI_t = 1 \text{ si } O_t \geq \overline{OI} \end{cases} \quad (4.11)$$

### 4.3.2 Définition des indicateurs de vulnérabilité

Une étape clé dans l'analyse et la gestion des risques est de construire des indicateurs de vulnérabilité du système par rapport aux risques identifiés. L'idée principale développée dans ce travail, est d'analyser les risques au niveau de l'entreprise sur la base de certains indicateurs de vulnérabilité. Très peu d'indicateurs de vulnérabilité pour les chaînes logistiques ont été proposés dans la littérature. A partir des indices que nous avons précédemment définis pour chaque niveau de la chaîne logistique, nous allons proposer des indicateurs de vulnérabilité dans le réseau. L'idée est de calculer le nombre de fois où le système atteint ses limites durant une fenêtre d'observation glissante  $d$ . La vulnérabilité du système peut se déterminer par la densité des indices  $II_t$  et  $OI_t$  durant  $d$ . En se basant sur ces indices nous proposons de construire des indicateurs par calcul de leurs moyennes glissantes. Les indicateurs portent sur quatre domaines importants du point de vue des vulnérabilités potentielles. Le tableau suivant résume les indicateurs de vulnérabilités à proposer et leurs effets sur les indicateurs de performances.

Indicateur de performance	Indicateur de Vulnérabilité à proposer	Description
Fiabilité	-Indicateur de rupture du stock	Dans le cas d'une de rupture du stock les produits ne seront pas livrés au bon moment. Ce retard présente une vulnérabilité sur la fiabilité de la chaîne
Flexibilité	-Limite d'approvisionnement -Indicateur d'excès de produits	Si on se trouve dans une situation de saturation du stock ou au contraire fréquemment avec des commandes nulles, cela veut dire qu'on ne suit pas les changements du marché. Ceci présente une vulnérabilité par rapport à la flexibilité de la chaîne.
Réactivité	-Indicateur de rupture du stock -Limite d'approvisionnement	Une telle situation augmentera le temps de traitement des commandes et la mise de disposition des produits chez le client, ce qui présente une vulnérabilité de la chaîne par rapport à sa réactivité.
Coût	-Indicateur saturation du stock -Indicateur de ruptures du stock	Le coût supplémentaire dû aux différentes perturbations des flux (pénalité de retard ou coût d'immobilisation de produits).

Tableau 10 : Définition des indicateurs de vulnérabilité.

Pour définir nos indicateurs de vulnérabilité nous allons utiliser la notation suivante.

Symboles	Désignations
$d$	Fenêtre d'observation glissante
<b>Les indicateurs</b>	
$DelInd$	Indicateur de rupture du stock durant une fenêtre glissante $d$
$ICostInd$	Indicateur de stock saturé durant une fenêtre glissante $d$
$CostInd$	Indicateur de surcoût durant une fenêtre glissante $d$
$LInd$	Indicateur d'excès de produits durant une fenêtre glissante $d$
$SInd$	Indicateur de limite d'approvisionnement durant une fenêtre glissante $d$

Tableau 11 : Table complémentaire de notations : les indicateurs.

### 4.3.3 Indicateur de rupture du stock

Un indicateur possible de la fréquence des ruptures du stock peut être construit à partir de la séquence des indices du stock. Pour une durée donnée  $d$  nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} DellInd(d) = \frac{1}{d} \sum_{t=1}^d \max(-II_t, 0) \\ DellInd(t) = DellInd(t-1) + \frac{1}{d} (\max(-II_t, 0) - \max(-II_{t-d}, 0)) \quad t > d \end{cases} \quad (4.12)$$

Un tel indicateur proche de 1 veut dire qu'on se trouve souvent dans une situation du stock zéro. Dans notre modèle, le délai de production d'un produit est nul, sauf si le stock est vide, en d'autres termes quand l'indice du stock vaut -1. Cet indicateur permet d'évaluer la fréquence des retards de livraison associés aux ruptures du stock. Ceci indiquera également que la qualité de service est faible du fait qu'on n'arrive pas à livrer la quantité souhaitée à temps.

#### 4.3.3.1 Indicateur de stock saturé

Un indicateur possible de la fréquence de la saturation du stock peut être construit à partir de la séquence des indices du stock quand ces derniers indiquent la valeur 1 durant un intervalle d'observation  $d$ . Cet indicateur correspond à une mauvaise adéquation de la capacité du stockage par rapport à la demande.

Le coût du stockage excédentaire est causé par la saturation de contrainte de capacité du stockage. On parle dans ce cas d'une immobilisation de produits. L'indicateur de coût relatif l'immobilisation de produits peut être indiqué par :

$$\begin{cases} ICostInd(d) = \frac{1}{d} \sum_{t=1}^d \max(II_t, 0) \\ ICosInd(t) = ICostInd(t-1) + \frac{1}{d} (\max(II_t, 0) - \max(II_{t-d}, 0)); \quad t > d \end{cases} \quad (4.13)$$

Le surcoût d'immobilisation des produits se calcule en multipliant l'indicateur de coût relatif l'immobilisation de produits, par le prix unitaire du produit, qu'on note  $Ci$ .

#### 4.3.3.2 Indicateur de surcoût

Dans le cas de ventes perdues (appelées aussi dans la littérature anglo-saxonne « lost sales ») le coût causé par l'annulation d'une commande peut être considéré comme identique à celui de l'attente de livraison différée du cas « Backorder »:

$$BCostInd(t) = DellInd(t) ; \quad t > 0 \quad (4.14)$$

De même le surcoût engendré par les ventes perdues se résulte en multipliant l'indicateur de coût relatif aux ventes perdues par le prix unitaire du produit, qu'on note  $Cl$ .

L'indicateur de surcoût total peut s'écrire en une sommation des deux coûts :

$$CostInd(t) = ICostInd(t) + BCostInd(t) ; t > 0$$

Ou encore :

$$\begin{cases} CostInd(d) = \frac{1}{d} \sum_{t=1}^d |II_t| \\ CostInd(t) = CostInd(t-1) + \frac{1}{d} (|II_t| - |II_{t-d}|) ; t > d \end{cases} \quad (4.15)$$

Si l'indicateur de surcoût total est fréquemment supérieur à un certain seuil cela veut dire que la chaîne logistique ne serait pas efficace et qu'elle doit être réorganisée.

Finalement, le surcoût total est la pondération des indicateurs de de surcoûts calculés.

$$Cost(t) = Ci * ICostInd(t) + Cl * BCostInd(t) ; t > 0$$

Notez que nous parlons d'un surcoût et non pas du coût parce que d'autres éléments s'interviennent pour calculer ce dernier, par exemple le coût de passation de commandes, le coût du transport, etc.

### 4.3.3.3 Indicateur d'excès de produits

Pour un étage donné, le cas où l'indice de l'ordre  $OI_t$  vaut -1 peut signifier qu'on se retrouve avec un excès des produits approvisionnés. Dans ce cas, l'unité de fabrication souhaiterait retourner un certain nombre des produits, dû à une baisse de la demande par exemple. En général cela n'est pas possible. Au minimum la commande réelle  $\Omega_t$  vaut zéro.

$$\begin{cases} LInd(d) = \frac{1}{d} \sum_{t=1}^d \max(-OI_t, 0) \\ LInd(t) = LInd(t-1) + \frac{1}{d} (\max(-OI_t, 0) - \max(-OI_{t-d}, 0)) ; t > d \end{cases} \quad (4.16)$$

On se retrouve avec le problème d'inadéquation à la demande.

### 4.3.3.4 Indicateur de limite d'approvisionnement

Pour un étage donné, la valeur de l'indice  $OI_t = 1$  représente le cas où au niveau d'un étage, on veut commander une quantité qui dépasse la capacité de son fournisseur. Pour

décrire cette situation et à partir de cet indice, nous proposons l'indicateur de l'incapacité de fournisseur à travers ces équations.

$$\begin{cases} SInd(d) = \frac{1}{d} \sum_{t=1}^d \max(OI_t, 0) \\ SInd(t) = SInd(t-1) + \frac{1}{d} (\max(OI_t, 0) - \max(OI_{t-d}, 0)); t > d \end{cases} \quad (4.17)$$

Un tel indicateur reflète la difficulté de satisfaire les commandes à lancer auprès de fournisseur.

Ces indicateurs glissants permettent une surveillance du système en temps réel et détectent des éventuels dérives.

## 4.4 Application

Dans cette section, nous reprenons l'exemple numérique que nous avons traité dans la section précédente, pour illustrer toutes les notions que nous venons de présenter.

Tout d'abord nous présentons la simulation des différents indices qui servent à observer les périodes où le système touche aux différentes contraintes. La Figure (4.8) respectivement la Figure (4.9), représentent l'indice du stock, respectivement l'indice de la commande.

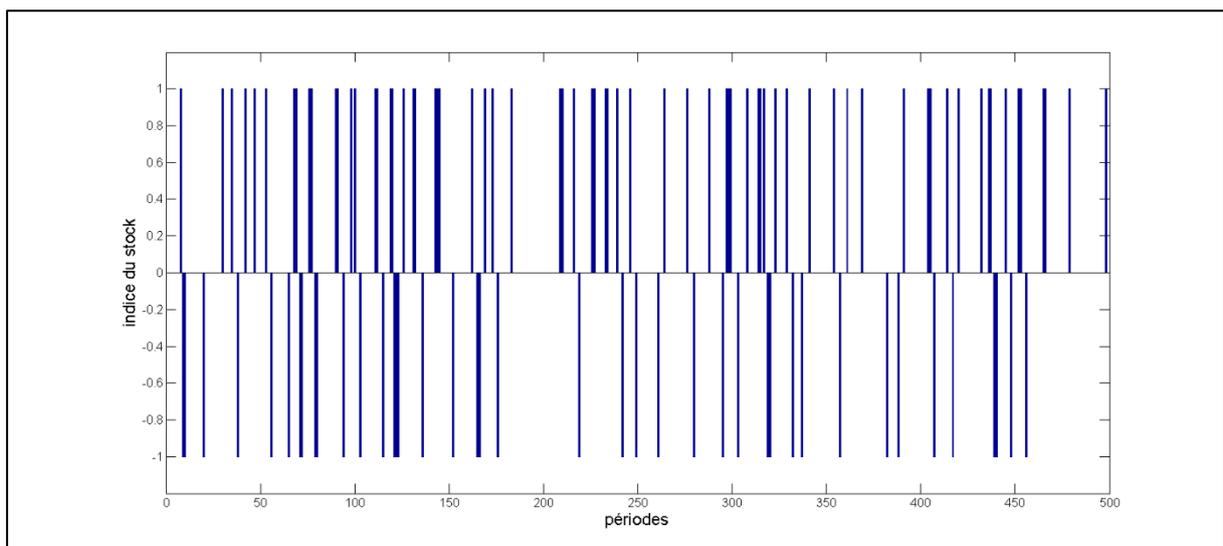


Figure 4-8: Indice relatif aux stocks

A partir de cette figure il est clair que la série du stock (voir figure 4.4) se trouve

fréquemment dans un état de sur-stockage.

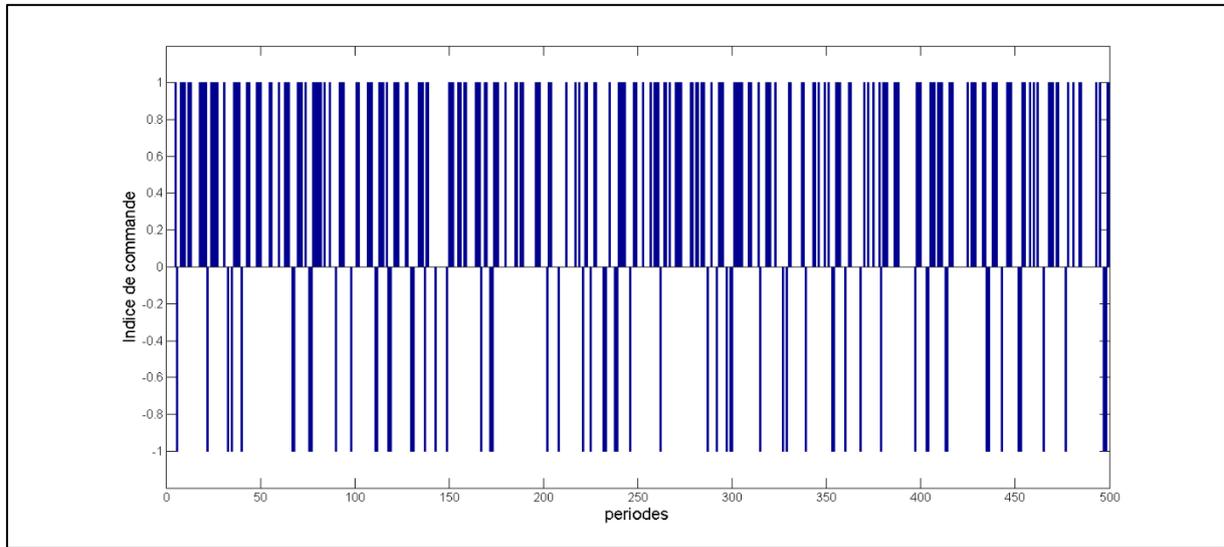


Figure 4-9: Indice relatif aux commandes

A partir de la figure relative à l'indice de commande nous pouvons constater qu'au niveau de l'étage considéré, certaines commandes n'étaient pas totalement satisfaites.

La dispersion de ces indices durant une fenêtre d'observation  $d=15$  nous a servi pour évaluer les différents indicateurs de vulnérabilités que nous avons proposé et dont les résultats de simulations sont présentés dans les Figures (4.10), (4.11), (4.12).et (4.13).

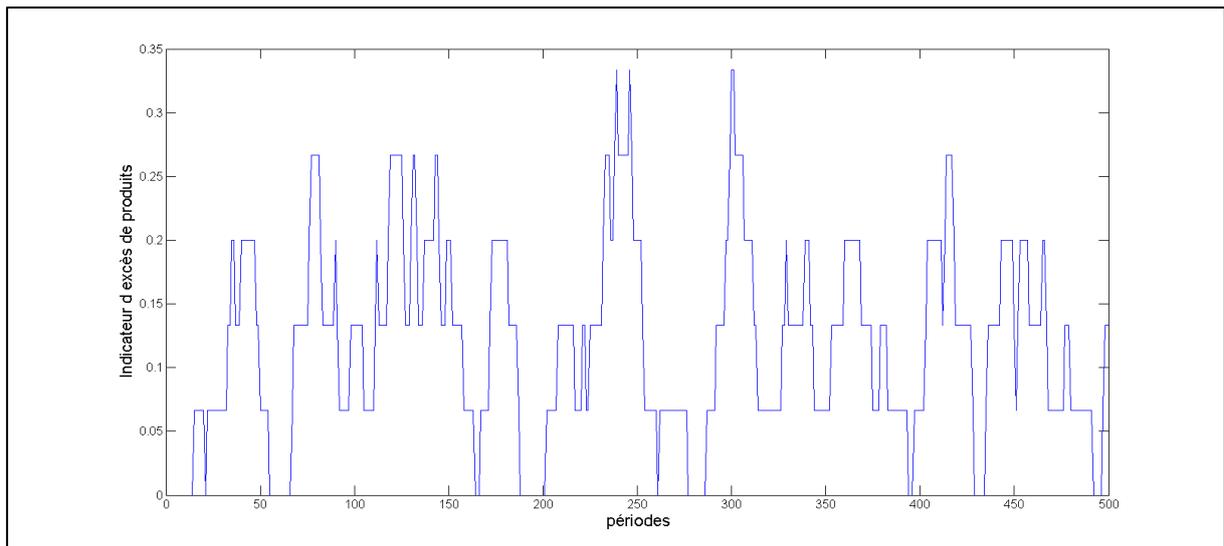


Figure 4.4-10: Simulation d'indicateur d'excès de produits.

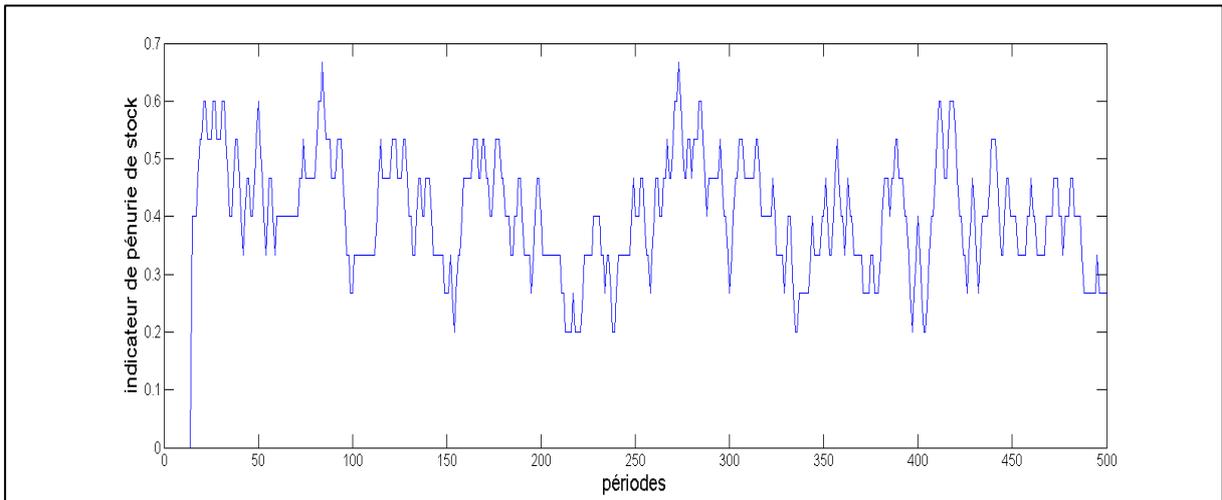


Figure 4-11: Simulation d'indicateur de pénurie du stock.

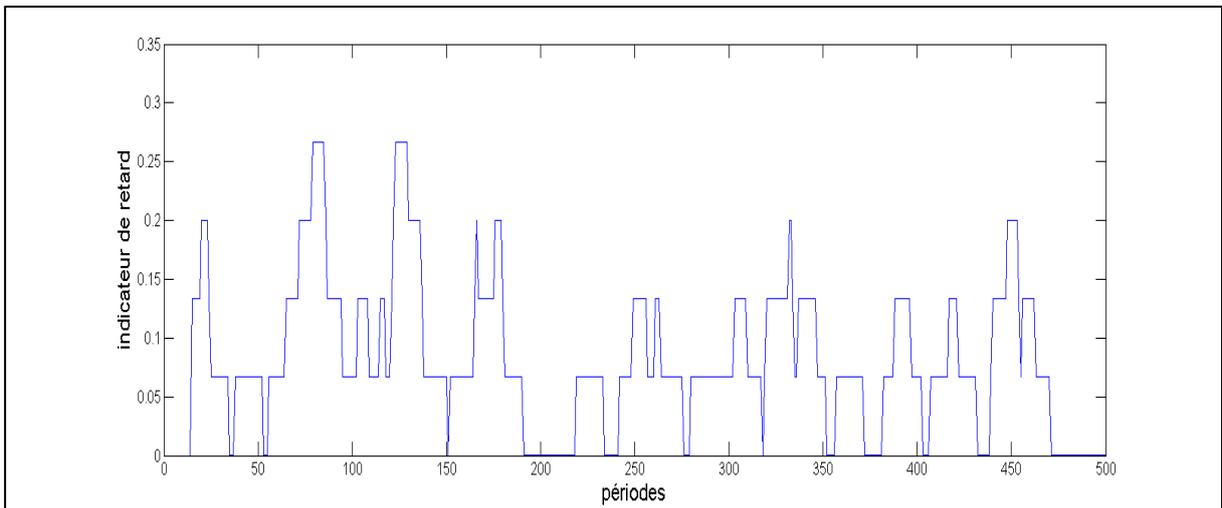


Figure 4-12 : Simulation de l'indicateur de retard.

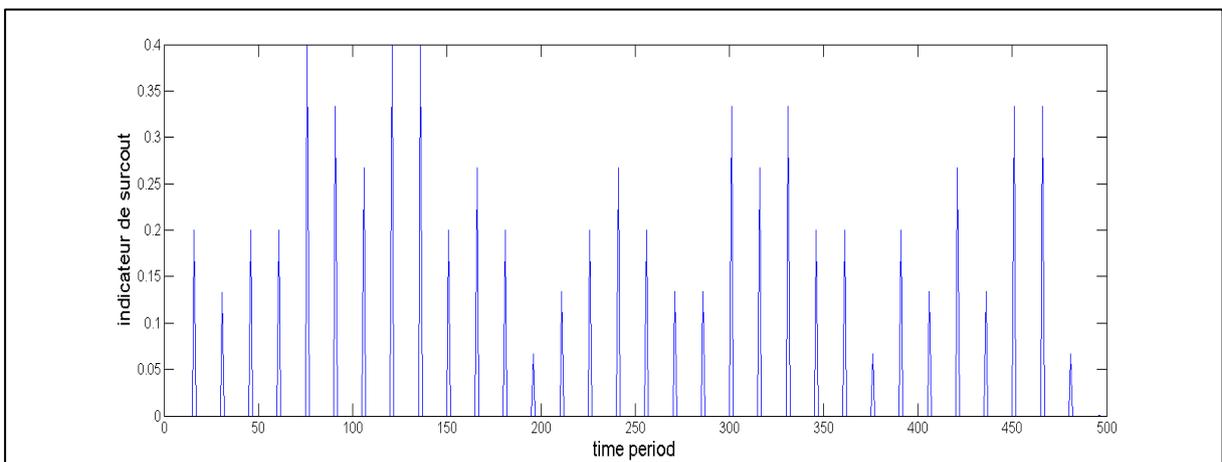


Figure 4-13 : Simulation de l'indicateur de surcoût.

Dans la suite, et pour illustrer l'effet de la perturbation de la demande, nous allons reprendre cet exemple, en variant la demande. Nous allons garder la même moyenne de la demande et changer sa variance de telle sorte nous obtiendrons les trois scénarios suivants :

Scénario	Demande	écart type
1	D1	10
2	D2	7,5
3	D3	5

Tableau 12 : Différentes demandes simulée

Nous proposons ensuite comparer le comportement de ces trois demandes à travers les indicateurs proposés. Dans le tableau suivant nous groupons les différents résultats obtenues, tout en supposant que la fenêtre d'observation glissante  $d=500$ .

Scénario	Demande	écart type	ICostInd	CostInd	LInd	SInd
1	D1	10	0.0805	0.2140	0.1177	0.3939
2	D2	7,5	0.0199	0.1204	0.0540	0.3531
3	D3	5	0.0120	0.1063	0.0240	0.2109

Tableau 13 : Résultats des simulations.

D'après ce tableau nous pouvons déduire que plus la demande est fluctuante, plus le système arrive à des états de déséquilibre et par conséquent devient vulnérable face aux évènements indésirables.

## 4.5 Conclusion

Les résultats de ce chapitre ont permis de caractériser l'effet de la variabilité de la demande sur le niveau du stock et la quantité de commande sur l'étage en amont.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté une extension de la modélisation des chaînes logistique à l'aide des modèles ARIMA, en prenant en compte des contraintes de capacités et de positivités. Une description détaillée de ces contraintes a été également évoquée. Afin de pouvoir comparer les niveaux du stock et les quantités de commandes, avec et sans la prise en compte des contraintes, nous avons eu recours à simulation sous Matlab.

Au niveau de la deuxième section nous avons proposé des indicateurs de vulnérabilités calculés à partir des indices qui indiquent, pour chaque période, si le système est à forte perturbation et touche à ses limites.

L'intérêt de ces indicateurs est d'évaluer les perturbations résultantes par rapport aux objectifs attendus en termes de performances. Les observations périodiques de ces indicateurs peuvent mettre en évidence les changements subis par les déséquilibres existants et permettre aussi de révéler les déséquilibres potentiels surveillance et détection des dérives qui nécessitant des décisions liées aux risques.

Dans le chapitre suivant, nous analysons d'autres cas de perturbations pour le même modèle, à deux étages avec un fournisseur.



## **PARTIE III : Etude de vulnérabilité d'une chaîne logistique à l'aide de la simulation**

## Introduction Partie III

Cette partie sera consacrée à la mise en œuvre du modèle analytique proposé au Chapitre 4 sur un cas d'étude de chaîne logistique. Le but de cette étude cas est d'évaluer par simulation les impacts des fortes perturbations des flux d'une chaîne logistique sur ses performances aussi bien au niveau de l'entreprise membre, qu'au niveau de la chaîne logistique globales.

Pour ce faire, la chaîne est modélisée à l'aide du modèle ARIMA sous contraintes, et la simulation sera basée sur des indicateurs que nous avons définis et présentés tout au long du Chapitre 4.

Dans le Chapitre 5 nous allons nous servir de ces indicateurs pour évaluer les impacts des perturbations observées au niveau des flux d'information, se manifestant sous forme d'incertitudes sur la demande, sur les variations des quantités des produits approvisionnés et sur le niveau du stock détenu au niveau de chaque étage.

Dans le Chapitre 6 nous allons étendre cette étude pour prendre en compte des perturbations des flux de produits, en particulier au niveau de qualité des composants. Nous allons par la suite nous servir de ces indicateurs pour évaluer les impacts des perturbations observées au niveau du flux physique sur les variations des quantités de produits approvisionnés et sur le niveau du stock détenu par chaque étage.

# Chapitre 5. Etude de vulnérabilité d'une chaîne logistique face à une forte perturbation de la demande

## 5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit le modèle de la chaîne logistique à l'aide des modèles ARIMA sous contraintes. Nous avons également proposé des indicateurs permettant, d'avoir une visibilité sur la vulnérabilité de système et d'étudier les répercussions des perturbations aux niveau d'un étage donné, en exploitant la dépendance entre la demande, le niveau du stock, et la quantité des commandes qui lui correspondent, ainsi que les répercussions sur les étages en amont, et ce, en exploitant la dépendance entre la commande de l'étage en cours et la demande d'un étage en amont.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en exergue des comportements d'une chaîne logistique (demandes, commandes, stockage,) lorsque cette dernière est soumise à des fortes perturbations. Les fortes perturbations prises en compte dans ce chapitre sont liées à la variation de la demande. Nous nous intéressons plus particulièrement aux situations d'une hausse et d'une baisse inattendues.

Pour bien analyser les résultats, nous nous focalisons sur une chaîne logistique élémentaire à deux étages, composée d'un producteur et de son fournisseur.

Nous allons, d'abord, présenter notre démarche d'évaluation dans la section 5.2. Ensuite, Nous allons présenter l'exemple que nous allons étudier dans la section 5.3. Au niveau de la section 5.3 nous définissons des scénarios de risques à travers la variation des paramètres de modèle proposé dans le Chapitre 4.

Tout au long de la section 5.5 nous étudions les répercussions des fortes perturbations de la demande sur le système et analysons la vulnérabilité du système à l'aide des indicateurs.

## 5.2 Démarche d'analyse

Les risques peuvent souvent être évalués par simulation selon certains scénarios qui ont été extraits de l'observation de la réalité. La difficulté est que chaque événement est unique et n'a de sens que relativement à son contexte d'apparition. Une approche prometteuse consiste à agréger les événements ayant les mêmes types de dommages sur le système.

Les événements d'une même classe peuvent résulter de causes différentes et/ou produire des dommages d'intensité différentes, mais leurs conséquences (ou dommages) portent sur les mêmes variables du système. Cette approche offre un compromis entre une évaluation précise des risques, et une réduction de la complexité dans le traitement des résultats de la simulation.

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux phénomènes de type « perturbation de la demande », sans nous préoccuper aux événements qui peuvent en être à l'origine. Nous considérons une chaîne logistique mise en série. Pour évaluer la vulnérabilité de cette chaîne logistique et la gravité des conséquences (ou dommages), face à une forte perturbation de la demande, nous proposons la démarche suivante qui consiste à :

1. Modéliser chaque étage de la chaîne logistique, à l'aide de modèle ARIMA sous contraintes.
2. Procéder par la simulation pour étudier le comportement du système comme suit
  - 2.a. Se situer au niveau du dernier étage, et générer une forte perturbation de la demande qui est supposée incertaine.
  - 2.b. Analyser le comportement de chaque étage, pour chaque durée d'observation glissante, en se basant sur les indicateurs qui lui correspondent (DInd, ICostInd, CostInd, LInd, SInd).
  - 2.c. Calculer l'intensité de la perturbation de la demande et des dommages pour en déduire la vulnérabilité.

## 5.3 Description du système

Nous proposons de simuler une perturbation de la demande. Pour ce faire, nous présentons le système sous étude auquel nous faisons varier la demande des clients, pour

tester les scénarios qui peuvent se présenter au décideur.

Nous considérons dans ce chapitre, un exemple d'une chaîne logistique composée de deux étages, avec producteur et son fournisseur.

Le dernier étage produit sur stock. Il possède un stock  $I_t$ , et lance à la fin de chaque période une commande  $O_t$ . Les périodes représentent les dates de planification des commandes (un jour, une semaine, etc.). Cet étage est géré par une politique de commande « Order up to », qui consiste à ramener son niveau du stock à un niveau de recombplètement  $S$ , et ce, en fonction de la position du stock à la fin de la période, de la demande actuelle et des commandes passées et dont on attend la réception.

Notons que la modélisation de la chaîne logistique à l'aide d'ARIMA supporte également la politique d'ordre stock nominal (base stock), comme nous le trouvons dans l'étude de Graves (1999). Notre choix est argumenté par les résultats obtenues dans la référence de (Hennet et Mercantini, 2010) où l'on trouve une comparaison entre ces deux politiques et où il est montré qu'un tel système a un comportement moins vulnérable avec la politique « order up to » face à l'incertitude sur la demande.

Nous supposons également que la quantité à recevoir à la date  $t$  correspond à ce qu'on a commandé à la période  $t-L$ , en d'autres termes, il n'y a pas de perturbation au niveau de flux physique et les temps de cycle sont supposés constants.

## 5.4 Définition des scénarios

Le modèle tel que présenté dans le Chapitre 4, prend en compte la perturbation aléatoire de la demande, permettant ainsi d'imiter le comportement réel d'une chaîne logistique. Dans ce chapitre nous nous intéressons aux perturbations des flux d'informations concernant la demande du client final. Notre objectif est de pouvoir mener une simulation qui permette de tester différents scénarios de risques qui perturbent l'information sur la demande et d'évaluer l'impact des fortes perturbations sur la performance et la réactivité de la chaîne logistique.

Dans ce cadre, nous menons une expérimentation mettant en œuvre les cas correspondant respectivement à :

1. Une augmentation inattendue de la demande
2. Une diminution inattendue de la demande

Sur une plage de simulation de durée  $T= 300$  périodes, nous avons réuni les différentes valeurs relatives à chaque scénario dans le Tableau 5.1 ci-dessous :

	périodes	Moyenne de la demande
Scénario initial	[1, 100]	30
Scénario 1	[100, 200]	45
Scénario 2	[200, 300]	20

Tableau 14 : Plan de simulation de la demande perturbée

## 5.5 Simulation du système

Dans un premier temps, le système est simulé sans la prise en compte des contraintes. Dans ce cas, la dynamique de système est donnée par les équations (3.16) et (3.18).

Dans un deuxième temps, nous introduisons les différentes contraintes. Sa dynamique sera simulée à la base des équations (4.4), (4.5) (4.6) et (4.7). Ceci permettra d'avoir une idée sur le comportement réel (avec contraintes) du système.

Les fortes perturbations sur la demande seront introduites dans le système étudié d'une façon additive, d'abord en augmentant la moyenne de la demande, puis en diminuant cette moyenne.

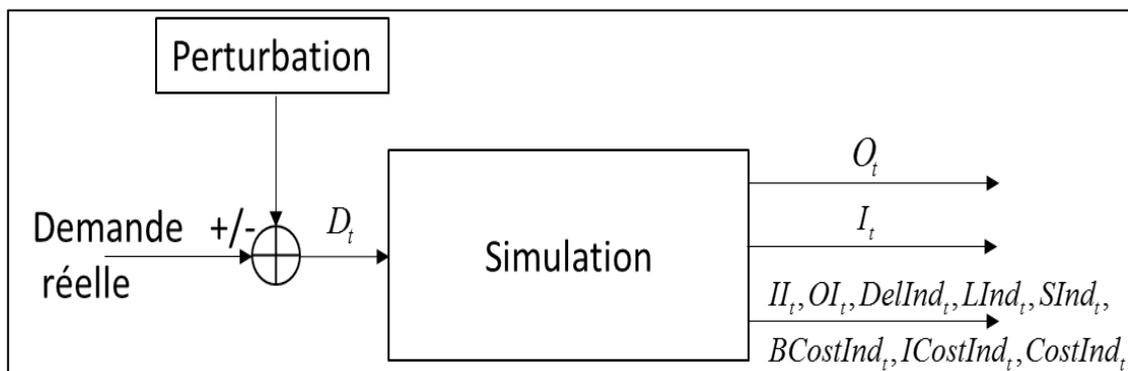


Figure 5-1 : Système de simulation avec une perturbation additive.

## 5.5.1 Simulation de la demande

Nous considérons l'exemple d'une demande stationnaire sous la forme additive suivante :

$$D_t = \text{moyenne} + \varepsilon_t$$

où  $\varepsilon_t$  est un bruit blanc.

Dans cette simulation, la demande est générée avec une simulation Monte-Carlo en définissant la moyenne et l'écart type pour décrire la variation autour de la moyenne.

Le fait d'augmenter la moyenne de la demande pour une durée donnée et pas pour une date particulière se justifie par notre volonté d'analyser le comportement du système non seulement en fonction d'une demande incertaine mais aussi en fonction de non stationnarités.

L'allure de la demande est donnée par la Figure 5-2. Cette figure permet l'observation de plusieurs phénomènes liés à la variation de la demande en particulier, nous distinguons clairement les deux cas transitoires relatifs à une hausse inattendue à la date  $t=100$  et à une baisse également inattendue à la date  $t=200$ .

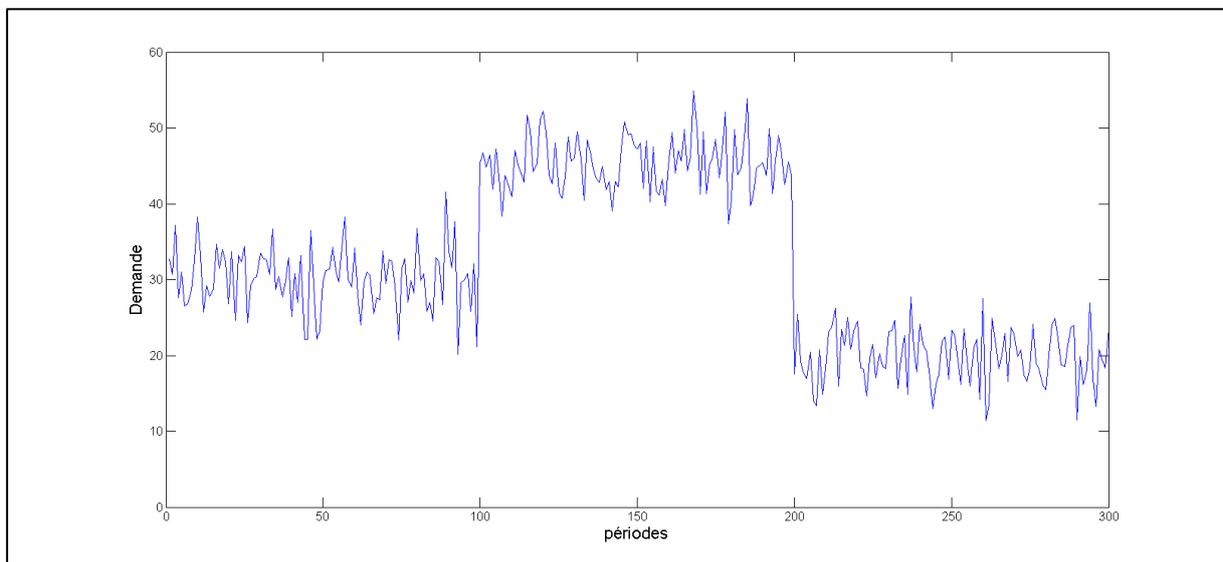


Figure 5-2 : Demande perturbée.

Le comportement de la demande est non stationnaire, mais ceci est supposé non connu

par le producteur.

La prédiction de la demande est donnée par la Figure 5-3. Les prédictions de la demande s'effectuent au fur et à mesure de l'avancement du temps. Elles serviront pour calculer les nouveaux niveaux du stock et ajuster les nouvelles commandes pour chaque période. Le prédicteur utilisé est un ARMA (2,0) donné par l'équation suivante :

$$\hat{D}_{t+2} = 0,559 * \hat{D}_{t+1} + 0,441 * \hat{D}_t \quad (5.1)$$

Notre simulateur, développé à l'aide de Matlab, se charge de remettre à jour les prédictions en fonction des demandes observées.

La Figure 5-3 qui trace les prévisions de la demande, montre que le prédicteur utilisé est assez fiable du fait. En effet, le prédicteur suit bien la courbe de la demande réelle, qui est supposée inconnue par avance.

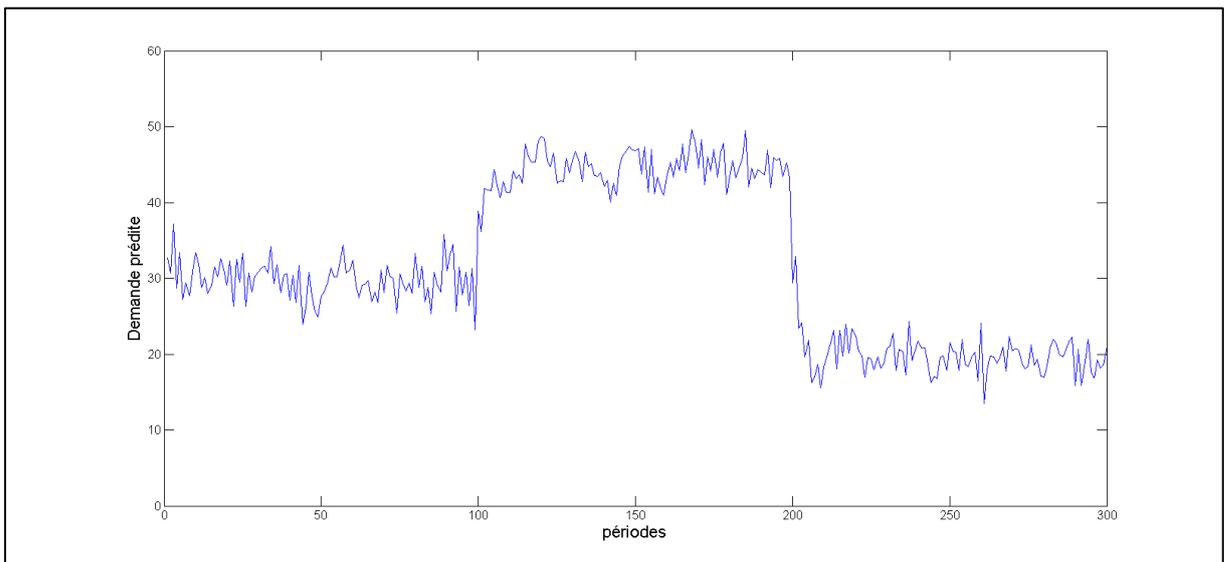


Figure 5-3 : Prédiction de la demande

Dans la suite nous allons simuler le comportement du système, avec et sans contraintes, face à la perturbation sur la demande. Pour le reste de la simulation nous avons utilisé les données suivantes.

Variable	Désignation	Valeur
S	Niveau de reemplètement	37
$\bar{II}$	Capacité maximale du stockage	55
$\overline{OI}$	Capacité maximale des commandes	45
L	Délai	3
$I_1, I_2, I_3$	Valeur initiale du stock	20
$O_1, O_2, O_3$	Valeurs initiales des commandes	35
d	Fenêtre d'observation glissante	15

Tableau 15 : Paramètres de la simulation.

### 5.5.1.1 Simulation du stock et des commandes sans les contraintes

La Figure 5-4 présente la variation du niveau du stock et la Figure 5-5 concerne l'évolution des quantités commandés, et ce, sans la prise en compte des contraintes.

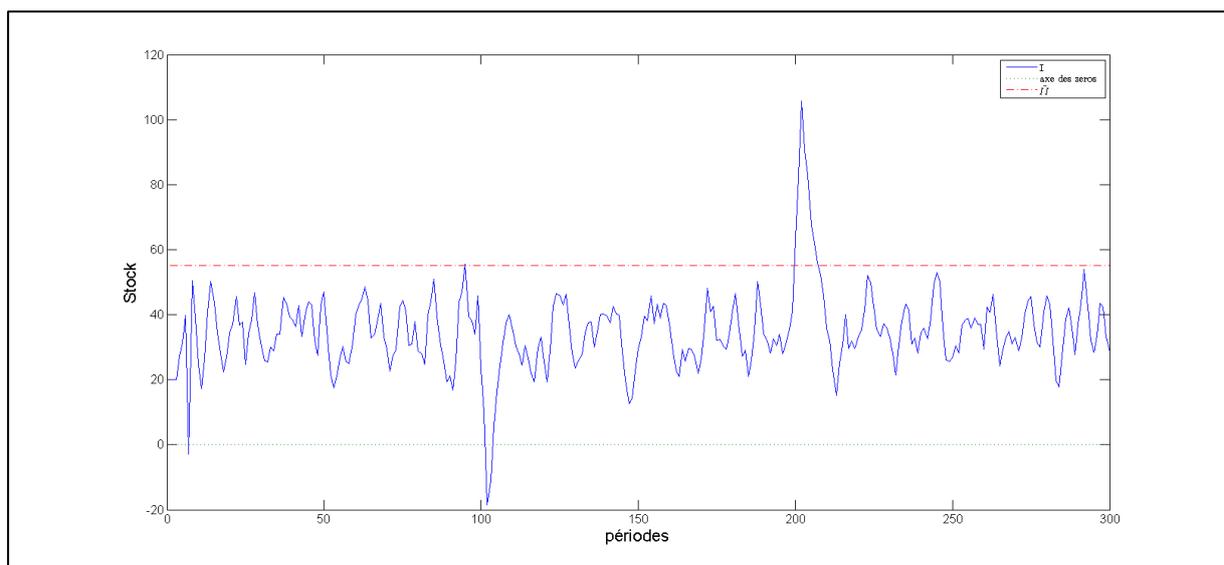


Figure 5-4: Dynamique du stock sans la prise en compte des contraintes

Dans la Figure 5-4, la ligne en rouge qui correspond à l'équation  $y(t)=55$ , concerne la capacité maximale du stockage du producteur. Nous pouvons voir que le système, sans la prise en compte des contraintes, dépasse la limite du stockage et a même pris des valeurs négatives.

Ceci est également observable pour la commande (Figure 5-5), où la contrainte

maximale des commandes est présentée par la ligne  $y(t) = 45$ .

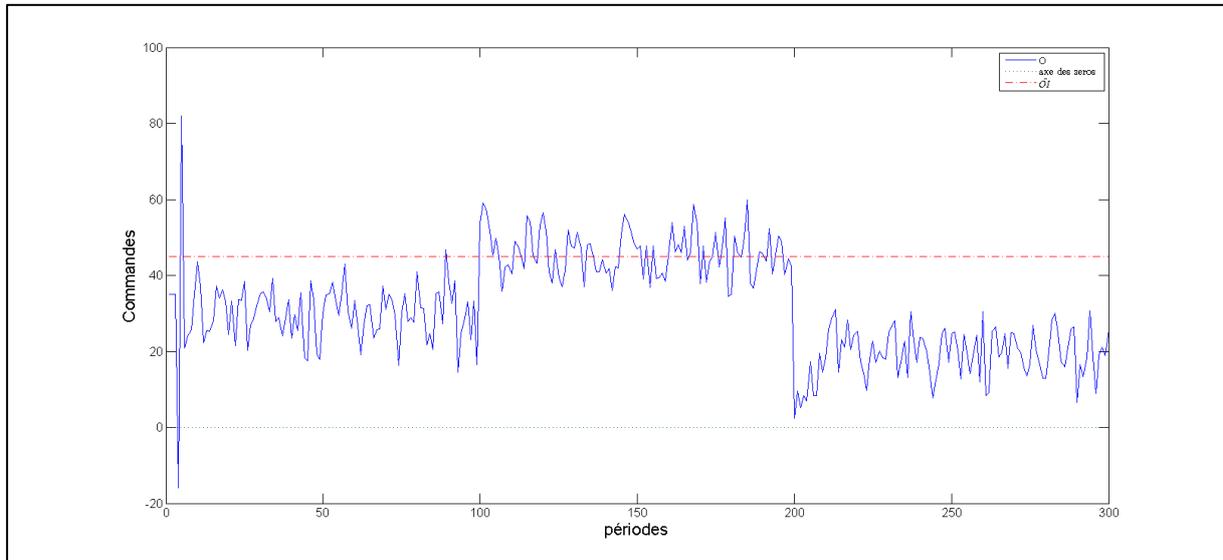


Figure 5-5: Evolution de la quantité commandée, sans prise en compte des contraintes.

Des telles évolutions n'étant pas réalistes, nous introduisons dans la suite les différentes contraintes dans notre simulation afin d'imiter le comportement réel d'une chaîne logistique.

### 5.5.1.2 Simulation du stock et des commandes avec les contraintes

En prenant en compte des contraintes du système, la Figure 5-6 représente la variation du niveau du stock, et la Figure 5-7 trace la quantité des différentes commandes lancées durant les périodes de simulation.

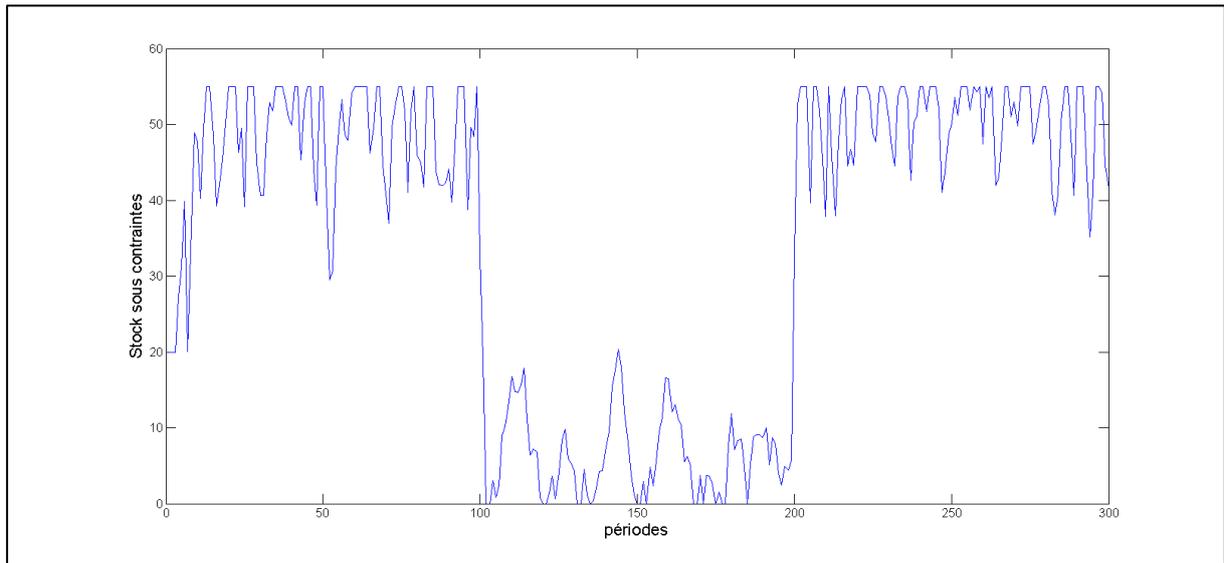


Figure 5-6 : Dynamique de niveau du stock avec la prise en compte des contraintes.

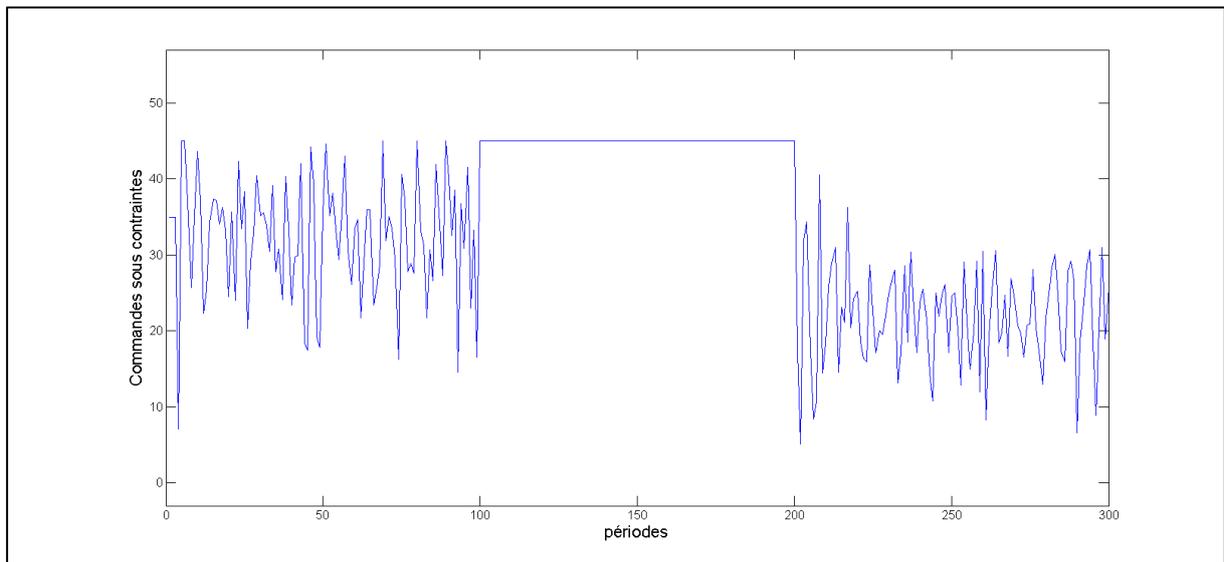


Figure 5-7 : Evolution des quantité commandées avec prise en compte des contraintes.

Avec prise en compte des contraintes, les figures ci-dessous montrent que le niveau du stock est borné entre zéro et 45 et que la quantité à commander est toujours entre zéro et 55. Manifestement, les commandes lancées entre les périodes 100 et 200 atteignent la limite maximale de capacité de commande.

## 5.5.2 Analyse et simulation des indices et des indicateurs

Au-delà du calcul prévisionnel de la demande, de la quantité à commander et du niveau du stock, l'intérêt du simulateur développé est de permettre une analyse du comportement de la chaîne en prenant en compte la variation aléatoire de la demande à travers les indicateurs de vulnérabilités définis dans le Chapitre 4.

### 5.5.2.1 Simulation des indices

Ici nous présentons les figures relatives à l'indice du stock et à l'indice lié à la commande, qui sont utilisés pour calculer les indicateurs de vulnérabilités.

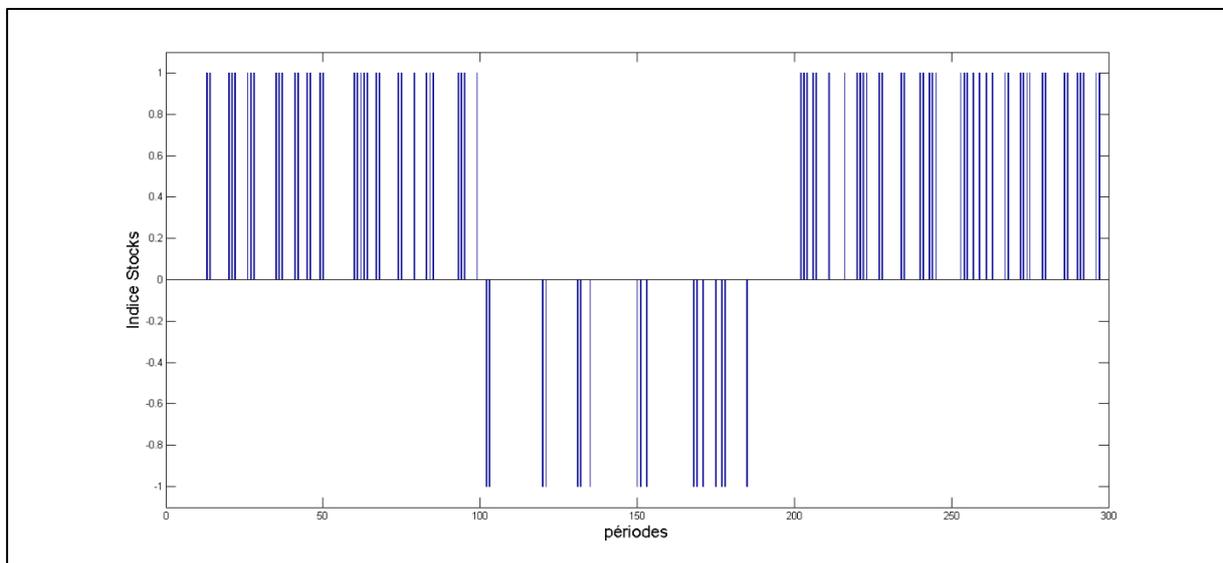


Figure 5-8 : Indice du stock  $II_t$ .

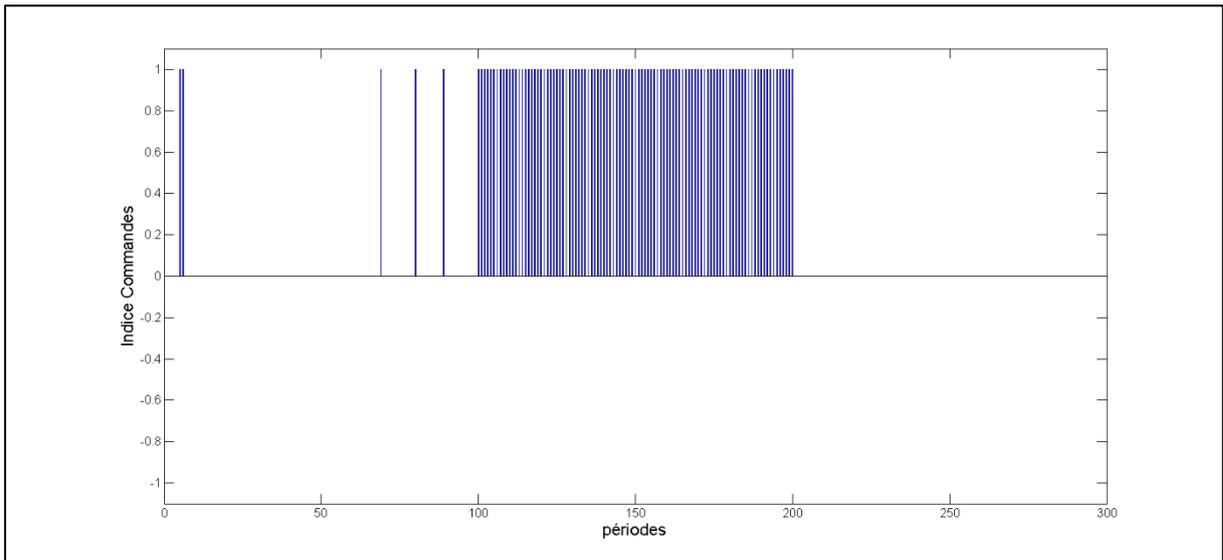


Figure 5-9 : Indice de commande  $OI(t)$ .

Les effets de la variabilité de la demande sont immédiatement visibles à partir des indices du stock (Figure 5-8) qui se trouve fréquemment en saturation. Le même constat est visible au niveau de l'indice de commande (Figure 5-9), dont on distingue particulièrement une concentration des valeur  $OI_t=1$  entre l'intervalle  $[100, 200]$  qui, rappelons le, marque une augmentation de la moyenne de la demande.

### 5.5.3.2. Simulation des indicateurs et analyse des résultats

Dans cette partie, nous allons examiner les répercussions de la perturbation sur la demande à partir de nos différents indicateurs. Nous nous situons au niveau du producteur. Pour chaque durée d'observation glissante  $d$ , les indicateurs de vulnérabilités sont évalués et les effets des perturbations sur les performances locales sont observés.

#### Indicateur de rupture du stock.

La Figure 5-10 concerne l'indicateur de rupture du stock  $DelInd(t)$ . Les cas des ruptures du stock présentent une situation vulnérable du système engendrant des retards, notamment quand ils sont assez fréquents. L'indicateur de rupture du stock mesure alors la vulnérabilité de l'étage face à la variation de la demande. Dans cet exemple, les ruptures du stocks sont détectées dans l'intervalle  $[102, 200]$ , c'est à dire, quand le producteur est confronté à une augmentation inattendue de la demande donnée par le scénario1. A l'exception des périodes  $t=118$  et  $t=119$  où il semble que le producteur arrive à s'adapter et à assurer les produits demandés à temps, le producteur se trouve dans des situations

relativement désagréables. En effet, d'après cet indicateur on arrive jusqu'à 40% des produits livrés en retard.

Durant les périodes du scénario initial (l'intervalle  $[1, 100]$ ), et du scénario 2, (intervalle  $[200, 300]$ ), cet indicateur ne présente pas une vulnérabilité à la rupture du stock face à la variation de la demande.

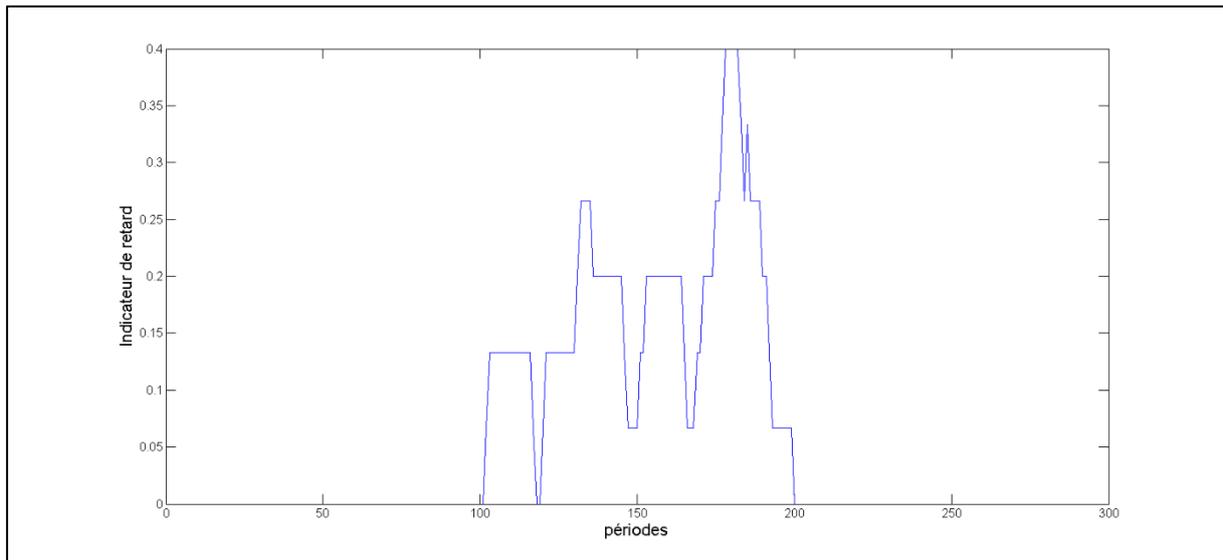


Figure 5-10 : Indicateur de rupture du stock DelInd (t).

### **Indicateur de limite d'approvisionnement.**

Afin de s'adapter à l'augmentation de la demande, le producteur augmente de son côté ses approvisionnements.

Si nous examinons la Figure 5-11, nous pouvons remarquer que dans l'intervalle des périodes  $[1, 100]$ , le producteur a lancé des commandes dont la quantité dépasse la capacité maximale du fournisseur. Si, nous comparons les valeurs de cet indicateur durant ces différents périodes par rapport à la valeur, du même indicateur, durant l'intervalle  $[100, 200]$  (scénario 1), nous pouvons aisément conclure que le producteur se trouve dans une situation plus vulnérable dans le deuxième cas, où l'indicateur a augmenté rapidement pour atteindre la valeur 1, et ce durant les périodes entre 100 et 200.

Nous en déduisons qu'avoir un seul fournisseur augmente la vulnérabilité de producteur face à l'augmentation inattendue de la demande.

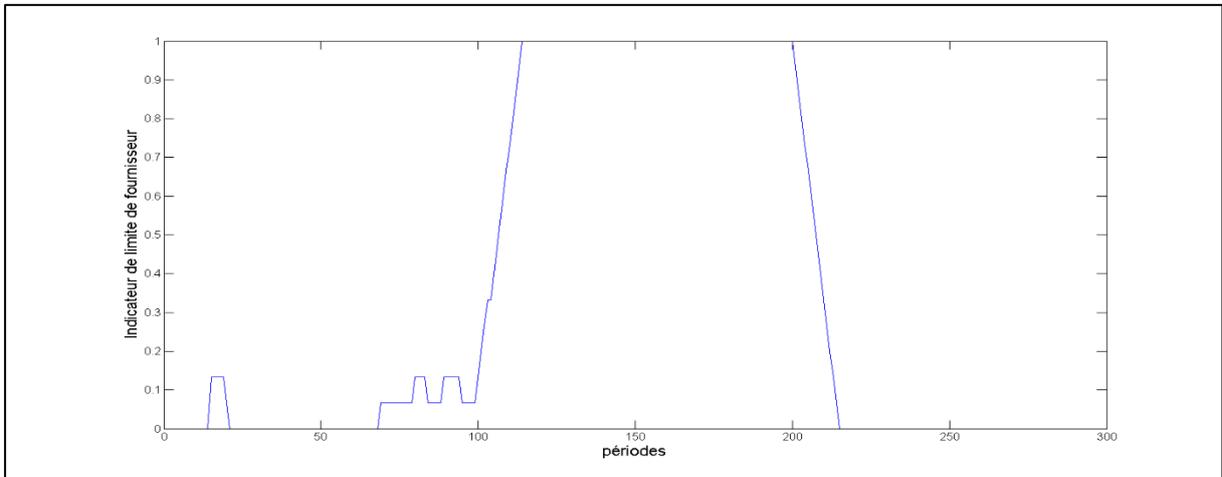


Figure 5-11 : Indicateur de limite de fournisseur  $SInd(t)$ .

Durant les périodes appartenant à l'intervalle  $[200, 300]$  qui concerne le deuxième scénario, cette vulnérabilité s'est réduite après quelques périodes d'observations, pour se stabiliser à la valeur de  $SInd(t)$  égale à zéro.

### Indicateur d'excès de produits.

Maintenant, nous allons observer la Figure 5-12, qui concerne l'indicateur de faible demande  $LInd(t)$ .

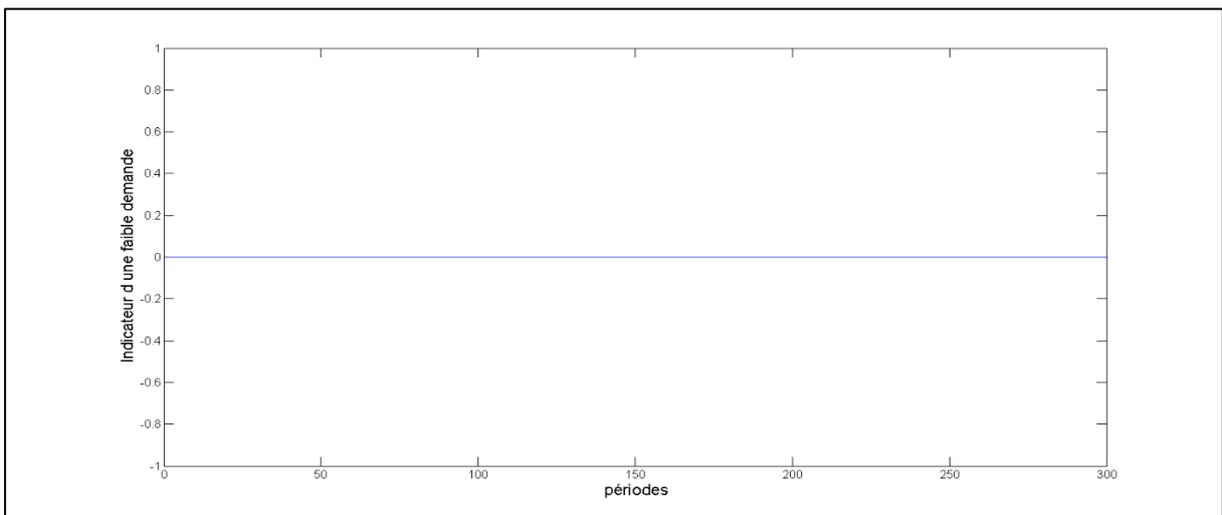


Figure 5-12 : Indicateur de faible demande  $LInd(t)$ .

Contrairement à tout attentes, l'indicateur de faible demande n'indique rien même quand la demande a chuté à la période  $t=200$ , et a passé d'une moyenne de 45 à une moyenne de 20, et plus précisément d'une valeur de 44 à une valeur de 17. En réalité ceci n'est pas étonnant du fait qu'en examinant la courbe de la commande sous contraintes (Figure 5-5) les commandes n'ont pas touché l'axe des zéros.

Le producteur se comporte bien, et ne présente pas une vulnérabilité face à un changement brusque relatif à une baisse de la demande.

### Indicateur de surcoûts.

Dans ce qui suit nous allons voir les répercussions des différentes perturbations issues du premier et deuxième scénarios sur les surcoûts.

La Figure 5-13 présente l'indicateur de saturation des stock. La saturation du stock présente un surcoût d'immobilisation de produit  $ICostInd(t)$ .

Dans notre exemple, le producteur a passé par des périodes de saturation du stock durant les premières périodes  $t$  appartenant à l'intervalle  $[1, 100]$ .

En présence de la perturbation de scénario 1, cet indicateur passe à zéro. Au contraire, sous le deuxième scénario, l'indicateur de surcoût d'immobilisation des produits  $ICostInd(t)$ , présente des fluctuations durant l'intervalle  $[200, 300]$ .

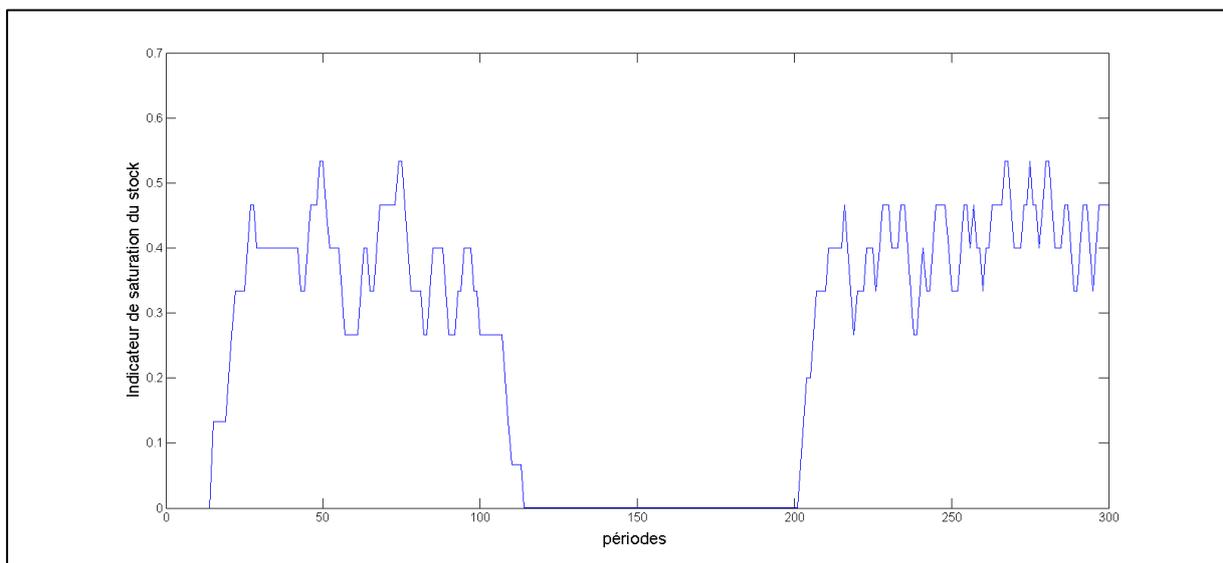


Figure 5-13 : Indicateur de surcoût  $ICostInd(t)$ .

D'après ces observations, l'augmentation de la demande a réduit le surcoût lié au stock. A l'inverse, la baisse de la demande engendre un cumul du stock.

Finalement, le surcoût total qui résulte des surcoûts relatifs à des demandes non assurées à temps et au surcoût d'immobilisation du stock est donné par la Figure 5-14. L'indicateur  $CostInd(t)$ , présente les conséquences de perturbations sur la demande et sur le stock durant la plage de simulation  $T=300$ .

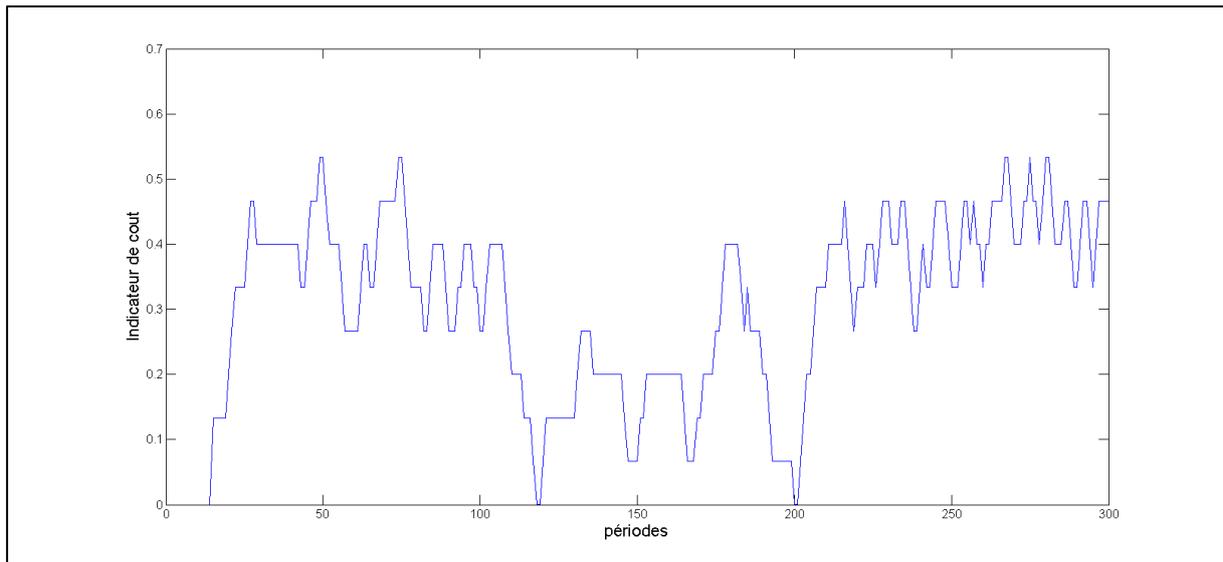


Figure 5-14 : Indicateur de surcoût total  $CostInd(t)$ .

En particulier nous y retrouvons les surcoûts de ruptures conséquents issus du scénario 1, et celui de problèmes liés à l'apparition du stocks excédentaires au scénario 2.

Dans cette configuration de la chaîne logistique, le surcoût issu de la diminution de la demande est plus faible de celui résultant de l'augmentation de la demande. Plus particulièrement, et pour ce cas de figure, en examinant l'indicateur de coût total entre la période 200 et la période 300, assurer la demande qui est assez faible devient assez coûteux du fait que le système se trouve devant des cas assez fréquents du stocks excédentaires.

## 5.6 Conclusion

Le chapitre a pour objectif d'analyser l'influence des fluctuations des valeurs de la demande finale sur le comportement de la chaîne à travers des indicateurs dont le but est

d'aider les décideurs à évaluer la vulnérabilité de son système.

Nous avons proposé une démarche pour étudier la vulnérabilité d'une chaîne logistique face aux fortes perturbations sur la demande issues de différents événements indésirables.

Nous avons appliqué cette démarche à un système composé d'un producteur et de son fournisseur, d'abord pour une augmentation de la moyenne de la demande du client, ensuite pour une baisse de la moyenne de cette demande.

Nous nous sommes situés au niveau du producteur pour étudier la répercussion de la variation de la demande sur son niveau du stock et sur les commandes lancées.

Dans l'exemple étudié, le producteur se trouve vulnérable face à l'augmentation inattendue de la demande dû, d'une part à la limite de sa capacité du stockage, et d'autre part à la limite d'approvisionnement auprès de son fournisseur. Ceci a entraîné des coûts suite à des ventes perdues.

De même, quand la demande a diminué, le système n'est pas vulnérable à une demande faible, mais se trouve sensible à la saturation de son niveau du stock, introduisant ainsi des coûts supplémentaires.

Dans le chapitre suivant nous allons étendre cette étude pour étudier la vulnérabilité d'une chaîne logistique face à la perturbation de flux physique, en particulier la perturbation sur la qualité de produit livrés par le fournisseur.



# **Chapitre 6. Etude de vulnérabilité d'une chaîne logistique face à une forte perturbation de qualité des produits reçus**

## **6.1 Introduction**

Dans le Chapitre 5, nous avons proposé une démarche pour analyser la vulnérabilité d'une chaîne logistique. Nous avons appliqué cette démarche sur un exemple d'une chaîne logistique, soumise à des fortes perturbations de flux en aval comportant les incertitudes liées à la demande de client.

Dans ce chapitre nous allons tourner notre attention vers les flux en amont, notamment à l'incertitude sur la qualité des produits reçus. Nous allons présenter le problème de mauvaise qualité des produits dans les chaînes logistiques dans la section (6.2). Puis, nous proposerons un modèle analytique qui prend en compte les perturbations sur la qualité des produits. Comme nous allons le voir dans la section (6.3), ce modèle sera une extension du modèle ARIMA sous contraintes. Dans la section (6.4) nous appliquons notre modèle sur un exemple de chaîne logistique à deux étages soumise à des fortes perturbations de qualité des produits. Nous allons nous servir de ce modèle pour étudier deux scénarios : le premier scénario concerne des fortes perturbations sur la qualité tout au long de la simulation, le second scénario décrit une chute de la qualité durant des périodes aléatoires.

## **6.2 Présentation du problème de la non-qualité**

Les objectifs de la chaîne logistique sont de minimiser les coûts tout en assurant le niveau de service et de qualité requise par le client, et ce, afin de maximiser la satisfaction des client. Ceci nécessite non seulement une gestion efficace de la production, de la distribution, du transport et de l'information, mais aussi, le choix des partenaires les plus fiables. En effet, un seul faux-pas dans le processus de sélection des fournisseurs peut coûter trop cher à une entreprise et à la chaîne logistique toute entière. Généralement, la qualité des produits représente un facteur clé pour déterminer la fiabilité d'un

fournisseur. Selon l'étude de Dickson (1966), les deux critères les plus importants (parmi 23) pour le choix de 33 fournisseurs étaient la « qualité du produit », et la « performance de la livraison ». ceci est étayé par l'étude de la littérature de Weber et al. (1991), qui couvre 74 articles sur le choix de fournisseurs et montre que les aspects liés au « prix », à la « livraison », à la « qualité » et à la « capacité de production » sont les critères le plus souvent pris en considération.

Selon (Ghédira, 2006), « Une entreprise est tenue d'offrir un produit respectant la qualité promise et non la meilleure qualité ». D'une façon générale, la qualité désigne l'ensemble des propriétés et des caractéristiques d'un produit ou service qui lui permet de satisfaire des besoins qui sont explicitement ou implicitement exprimés (ISO 8402). Selon la même norme, la qualité représente l'aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques à satisfaire des exigences ». Ainsi la qualité d'un produit couvre aussi bien sa performance que sa disponibilité.

Plusieurs facteurs peuvent contribuer au problème de non-qualité des produits intermédiaires ou finaux. Tout d'abord, le problème de non-qualité des produits peut se produire au niveau du choix de la matière première. Il peut aussi se produire durant le processus de fabrication en raison des problèmes liés aux machines ou à la non compétence des ouvriers. La qualité peut également se dégrader au cours de la manutention, du transport ou encore au moment du stockage. Durant ces opérations, les produits peuvent être aussi endommagés notamment quand il s'agit des produits fragiles.

Un autre cas qui peut se rajouter au problème de non-qualité des produits, et qui est relativement fréquent, est celui de dépassement de la date de consommation du produit. Un dernier cas qui peut se présenter est quand la qualité des produits livrés devient insuffisante, en contrepartie, parce que les exigences des clients augmentent, sans qu'il soit possible faire évoluer les processus de fabrication.

La quantité de rebut qui ne respecte pas la qualité souhaitée peut être renvoyée au fournisseur afin d'être réparée ou de reprendre toutes les étapes qu'il avait déjà subies. A titre indicatif le taux de reprises chez Acta-Mobilier est de 30% et peut arriver jusqu'à 80% pour certains produits (Noyel et al. 2014).

D'autres produits ne respectant pas la qualité peuvent être acceptés par l'entreprise avec un prix plus bas ou aussi considéré comme déchets et donc jetés. Ils pourront aussi être écoulés à prix réduit ou seront considérés comme perdus. Ceci dépend de la nature de la marchandise et de la gravité de défaut.

Nous citons l'exemple d'un groupe agroalimentaire américain la société Mars incorporation qui après un fragment en plastique retrouvé sur une barre chocolatée, vient de retirer de marché des millions de ses produits écoulés dans 55 pays. L'incident provient d'une erreur dans un site de production à Veghel, aux Pays-Bas. Le directeur de l'entreprise a expliqué que lors du changement d'une conduite, un couvercle en plastique s'est introduit dans le processus de production.

## 6.3 Présentation du modèle ARIMA sous contraintes avec la prise en compte de l'indicateur qualité

Comme nous l'avons évoqué dans la section précédente, il n'est pas sûr que la quantité reçue à la date  $t$  correspond à ce qu'on a commandé à la période  $t-L$  avec la qualité souhaitée.

Pour prendre en compte cette incertitude, nous allons étendre le modèle ARIMA sous contraintes que nous avons présenté dans le Chapitre 4, en introduisant un indicateur mesurant la qualité des composants reçus.

Cet indicateur servira comme une entrée dans notre modèle. Il peut être évalué préalablement en supposant que le nombre des pièces défectives suivent une loi de probabilité connue, ou en divisant la quantité reçue qui correspond aux commandes passées par la quantité totale reçue. Dans ce travail nous nous intéressons à ce dernier cas. Le cas idéal est lorsque les attentes du client ont été honorées et que le client est totalement satisfait. Dans un tel cas, l'indicateur de qualité  $Z$  serait égal à 1.

### 6.3.1 Notation

Pour modéliser la chaîne logistique avec prise en compte de l'incertitude sur la qualité des produits du fournisseur, nous utilisons les notations suivantes :

$D_t$	Demande aléatoire à la période $t$
$\hat{D}_t$	Demande estimée à la période $t$
$\mu$	Moyenne de la demande
$I_t$	Niveau du stock à la fin de la période $t$

$\Omega_t$	La commande placée à la période $t$ avec prise en compte de perturbation sur la qualité des produits reçus
$O_t$	La commande placée à la période $t$
$B_t$	la quantité des livraisons différées « backorder » à la période $t$
$\bar{II}$	Capacité maximale du stockage
$II_t$	Indice du stock à la période $t$
$S$	Niveau de Recomplètement
$\bar{OI}$	Capacité maximale de fournisseur
$OI_t$	Indice de l'ordre à la période $t$
$Z_t$	Indicateur de qualité à la période $t$
$\hat{Z}_t$	Indicateur de qualité estimé (prédicteur de qualité) à la période $t$

Tableau 16 : Table des notations de problème de non-qualité ;

Nous rappelons que le modèle élémentaire d'une chaîne logistique est donné par la demande que reçoit un étage à la période  $t$  ( $D_t$ ), le niveau du stock qu'on détient à la fin de la période  $t$  ( $I_t$ ) et la commande à lancer pour la période  $t+L$  ( $O_t$ ) où  $L$  est l'intervalle de temps qui sépare la date où une commande est passée et la réception des produits, englobant le lancement de la commande, la production, et le transport .

Suite à l'incertitude sur la qualité des produits livrés par le fournisseur, le stock détenu est différent de ce qui est prévu, du fait que les pièces défectueuses ne sont pas considérées pour déterminer le niveau du stock. Pour que notre modèle prenne en compte l'incertitude sur la qualité, il faut ajuster le niveau du stock  $I_t$ .

Soit  $z_t$  un indicateur de qualité. Indépendamment de la loi d'évolution de  $z$  dans le temps, l'équation dynamique de l'évolution du stock prend la forme suivante :

$$I_t = I_{t-1} + O_{t-L} * z_t - D_t \quad (6.1)$$

Cette équation actualise le niveau du stock en fonction de réception des produits qui proviennent du fournisseur en période  $t$ . L'évolution du stock sous contraintes de positivités et de capacités du stock devient :

$$\begin{cases} I_t = \min (I_{t-1} + O_{t-L} * z_t - B_{t-1} - D_t, \bar{II}) \\ I_t = \max (I_{t-1} + O_{t-L} * z_t - B_{t-1} - D_t, 0) \end{cases} \quad (6.2)$$

Ici, la perturbation sur la qualité n'est pas encore prise en compte lors de

l'approvisionnement. Afin de compenser le manque de la fiabilité du fournisseur et de renforcer la résilience de la chaîne, nous proposons d'ajuster la valeur de la quantité à commander. Pour ce faire, nous proposons de prévoir la perturbation de l'indicateur de qualité en se basant sur les valeurs de cet indicateur observées dans le passé. Ainsi, l'équation de la commande à stock de référence sur la position du stock devient:

$$\Omega_t = \frac{1}{\hat{z}_t} (S - I_t + \hat{D}_{t+1} + \dots + \hat{D}_{t+L} + B_t) - \Omega_{t-1} - \dots - \Omega_{t-L+1} \quad (6.3)$$

L'équation (6.3) nous permet de réécrire la quantité réelle à commander, en prenant en compte des contraintes de positivités et de capacités, de la façon suivante :

$$\begin{cases} O_t = \min (\Omega_t, \overline{OI}) \\ O_t = \max (\Omega_t, 0) \end{cases} \quad (6.4)$$

Ainsi le modèle présentant un étage de la chaîne logistique en prenant en considérations les contraintes du système et la perturbation de la qualité des intrants est donné par la demande  $D_t$ , le niveau du stock  $I_t$  et la commande  $O_t$ . Nous pouvons désormais, caractériser le comportement des autres étages à l'aide de la simulation.

Il est à remarquer que le modèle résultant comprend une perturbation multiplicative.

Dans la suite nous allons utiliser ce modèle étendu pour analyser le comportement d'une chaîne logistique soumise à des fortes perturbations sur la qualité des produits à travers un exemple.

## 6.4 Application

Nous proposons d'étudier le comportement d'un système composé d'un producteur et de son fournisseur. Pour illustrer l'application du modèle précédemment défini, nous présentons d'abord les paramètres définissant le système sous étude. A l'aide de la simulation, l'évolution du niveau du stock, et des commandes à lancer, seront déterminés, tout en considérant que la demande suit une marche aléatoire.

Nous introduisons dans ce système la perturbation du flux de produits reçus en introduisant la variation de l'indice de qualité  $Z_t$ .

Pour ce faire, nous allons introduire cet indicateur de qualité, dans le modèle ARIMA

sous contraintes en supposant que la quantité reçue à la période  $t$ , ne correspond pas à la quantité commandée à la période  $t-L$ .

Nous nous situons dans les cas extrême pour étudier les effets des évènements indésirables sur la qualité des produits reçus, et par conséquent sur la chaîne logistique. Deux cas de figures se présentent :

- $Z$  est aléatoire le long de la simulation. Selon ce scénario la qualité des produits reçus, subi des fortes perturbations, observées pour chaque période.
- $Z$  est déterministe qui vaut 1, avec des dates de perturbations aléatoires ramenant cette valeur à une autre égale à zéro. Avec ce scénario, on suppose que le producteur reçoit des produits selon ses attentes, mais peut se trouver avec une qualité fortement dégradée, qui arrive à perdre toute la quantité reçue, durant des périodes aléatoires.

Pour chaque scénario, nous étudions la vulnérabilité du système à l'aide de la simulation d'une chaîne logistique, modélisée par notre modèle étendu, en examinant les indicateurs des vulnérabilités proposés dans le Chapitre 4.

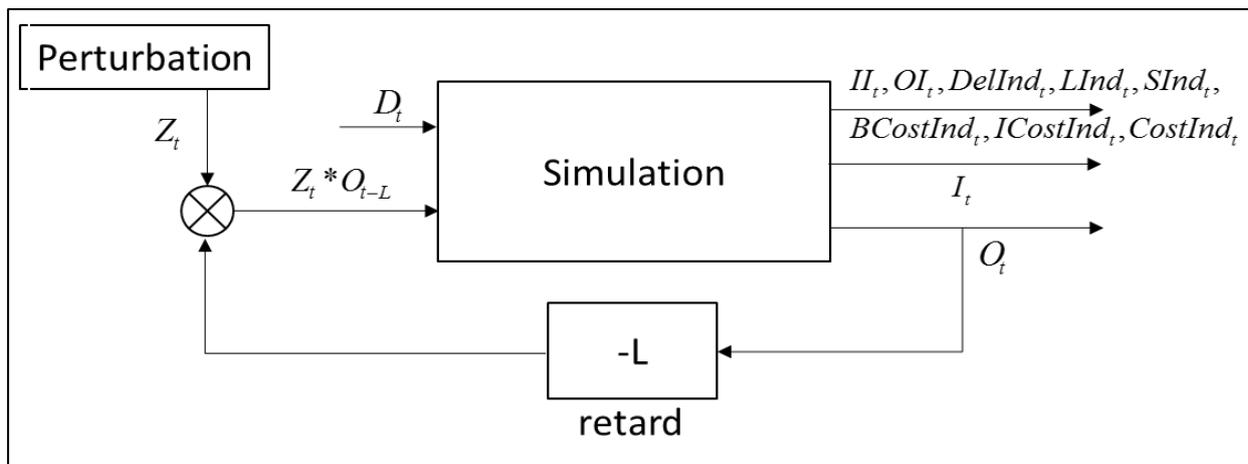


Figure 6-1 : Système de simulation avec une perturbation multiplicative.

## 6.4.2 Analyse du système

Nous nous proposons de suivre le comportement d'un système formé par un producteur et son fournisseur. Le producteur fait l'objet d'une demande aléatoire  $D_t$ . Nous nous intéressons à un seul produit qui transite du fournisseur vers le producteur.

Le producteur est soumis à une contrainte de capacité maximale d'approvisionnement  $\overline{OI} = 250$ , c'est la quantité maximale des produits que peut assurer son fournisseur. De même le producteur est soumis à une capacité maximale du stockage  $\overline{II} = 250$ , c'est la quantité maximale des produits que peut stocker.

Cet étage reçoit des demandes aléatoires de la part de son client. Nous supposons que la demande initiale du client final est stationnaire comprenant une composante additive  $\varepsilon_t$  (un bruit blanc) qui présente des chocs aléatoires. Nous supposons également que la demande est représentée dans ce cas par un modèle aléatoire ARIMA (0,0,1) s'écrivant comme suit :

$$D_t = \mu + \varepsilon_t$$

Dans cet exemple , nous générons un ARMA (0, 0,1) de moyenne  $\mu = 160$  et d'écart type  $\sigma = 15$  pour définir la demande durant une plage de temps  $T=300$  périodes. Nous générons la demande une seule fois au début de la simulation. Lors de l'approvisionnement à une date  $t$ , nous supposons que nous ne disposons que des observations des demandes dans le passé et que les demandes à partir de cette date  $t$  sont inconnues.

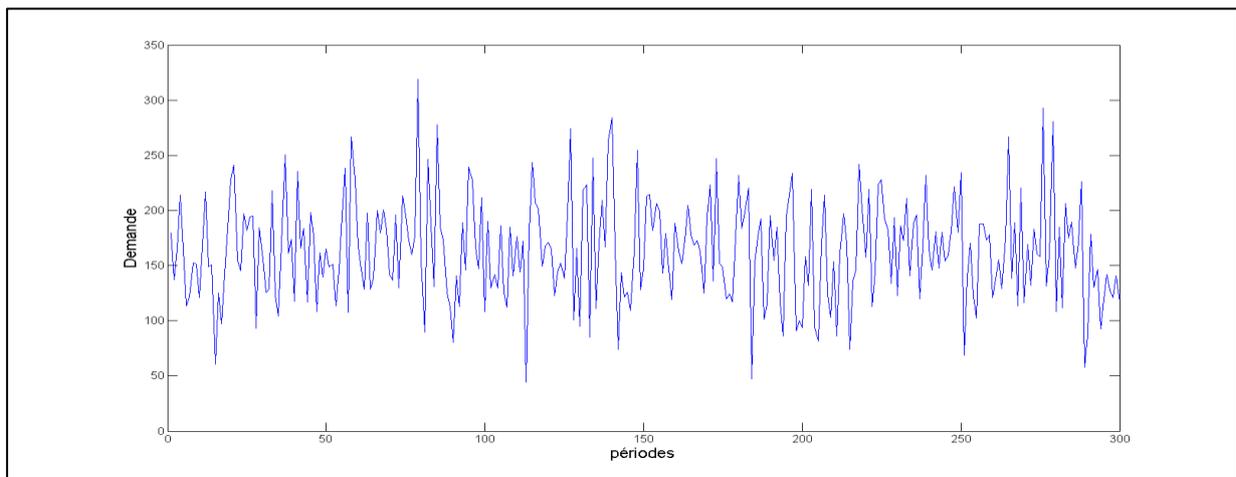


Figure 6-2 : Dynamique de la demande.

Le calcul de la quantité d'approvisionnement s'effectue en se basant sur les prévisions des demandes futures. Pour cet exemple, le prédicteur de la demande est construit en prévision récursive avec un facteur d'oubli comme suit.

$$\begin{cases} \hat{D}_1 = \mu \\ \hat{D}_{t+1} = (1-\alpha) D_t + \alpha \hat{D}_t, \quad \forall t = 2, 3, \dots \end{cases}$$

La courbe de  $\hat{D}_t$  présentée par la Figure 6-3 regroupe les différentes valeurs de la demande prévue en fonction des différentes valeurs de  $\alpha$ .

Dans cet exemple numérique, nous privilégions la nouvelle valeur de la demande lors des prévisions. La valeur utilisée du facteur d'oubli est  $\alpha = 0.85$ .

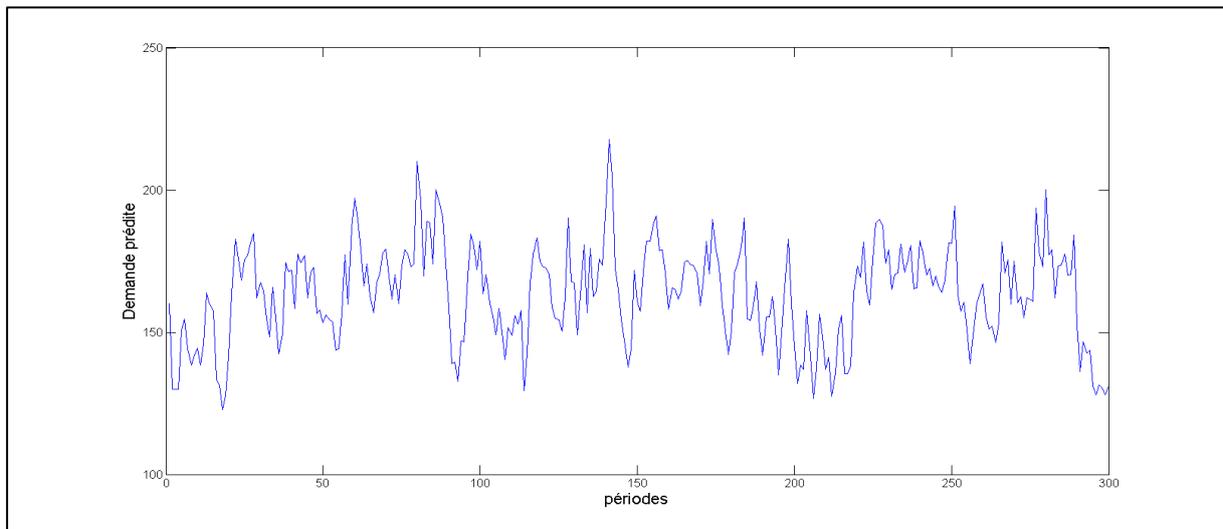


Figure 6-3 : Prédiction de la demande.

### 6.4.3 Présentation des scénarios de perturbation

Pour la suite de ce travail, et afin de valider nos résultats analytiques, deux scénarii sont analysés, pour étudier la perturbation sur la qualité des produits.

- Dans le premier cas nous supposons que l'indicateur de qualité est aléatoire avec des variations autour d'une valeur moyenne.
- Dans le deuxième cas l'indice de qualité présente des sauts déterministes prenant deux valeurs  $0$  ou  $+1$ , se produisant à des moments aléatoires (un tel exemple peut présenter le cas de panne machine fréquent).

### 6.4.3.1 Cas d'une perturbation aléatoire de qualité

Un exemple de variations aléatoires est quand l'indicateur de qualité  $z_t$  est ARMA (0,1) sous contraintes. L'indicateur de qualité est supposé inconnu au préalable. Pour estimer son évolution future, il suffit de procéder comme pour la demande, c'est-à-dire, il faut d'abord observer les données obtenues de l'indicateur, pour le modéliser avec une série chronologique  $z_t$ , puis et à base de son historique, prévoir son comportement, représenté par la série  $\hat{z}_t$ .

Pour simuler  $z_t$  avec Matlab, nous commençons d'abord, par générer un processus ARMA (0, 1) que nous nommons  $\zeta_t$ . Pour ce faire, il suffit de générer un bruit blanc  $e_t$  qui suit une loi normale d'espérance 0 et de variance sigma puis, en supposant que la qualité est de moyenne h, cette moyenne sera rajoutée au bruit blanc  $e_t$ . Enfin, après avoir formé  $\zeta_t$ , nous effectuons une troncature pour obtenir  $z_t$ . La troncature est utile pour s'assurer que la qualité soit entre zéro et un.

### 6.4.3.2 Cas d'une qualité déterministe avec des dates aléatoires

Le deuxième cas étudié concerne un indicateur de qualité avec des valeurs déterministes présentant des sauts aléatoires. Un exemple typique de ce cas est quand la qualité des produits obtenues est de 1 et passe à zéro durant les l'intervalles [T1, T2] et [T2, T3].

Les dates T1, T2, T3 sont des dates aléatoires qui peuvent être obtenues par la simulation à partir des lois uniformes dans des intervalles donnés.

- $Z_t = 1$  représente le cas où la quantité reçue respecte la qualité désirée. Le cas opposé,
- $Z_t = 0$  représente le cas où le fournisseur ne peut pas livrer le produit demandé. Un tel cas peut être dû à une interruption dans la phase de production (panne de machines, grèves, etc), ou dû à des problèmes du transport.

Pour la clarté du reste de document nous avons résumé ces deux cas de perturbations dans le tableau Tableau 17 ci-dessous.

	$z_t$ aléatoire	$z_t$ déterministe, à dates de variation aléatoires
Modèle	$e_t$ suit une loi normale $N(0, \sigma)$ $\zeta_t = h + e_t$ $\begin{cases} z_t = 1 & \text{si } \zeta_t > 1 \\ z_t = \zeta_t & \text{si } 0 \leq \zeta_t \leq 1 \\ z_t = 0 & \text{si } 0 < \zeta_t \end{cases} \quad (6.5)$	$T1, T2, T3, \text{ et } T4$ , suivent une loi uniforme $\begin{cases} z_t = 1 & \text{si } 0 \leq t \leq T1 \\ z_t = 0 & \text{si } T1 \leq t \leq T2 \\ z_t = 1 & \text{si } T2 \leq t \leq T3 \\ z_t = 0 & \text{si } T3 \leq t \leq T4 \\ z_t = 1 & \text{si } T4 \leq t \leq T \end{cases} \quad (6.6)$
Description	Perturbations répétitives tout le long de la plage de simulation	Perturbations à des dates fixes. Ces dates sont inconnues au préalable.

Tableau 17 : Modèles des scénarios de perturbations des flux.

La Figure 6-4 présente la dynamique de l'indicateur de qualité, défini selon le premier scénario et la Figure 6-5 concerne l'évolution de l'indicateur de qualité comme le décrit le deuxième scénario.

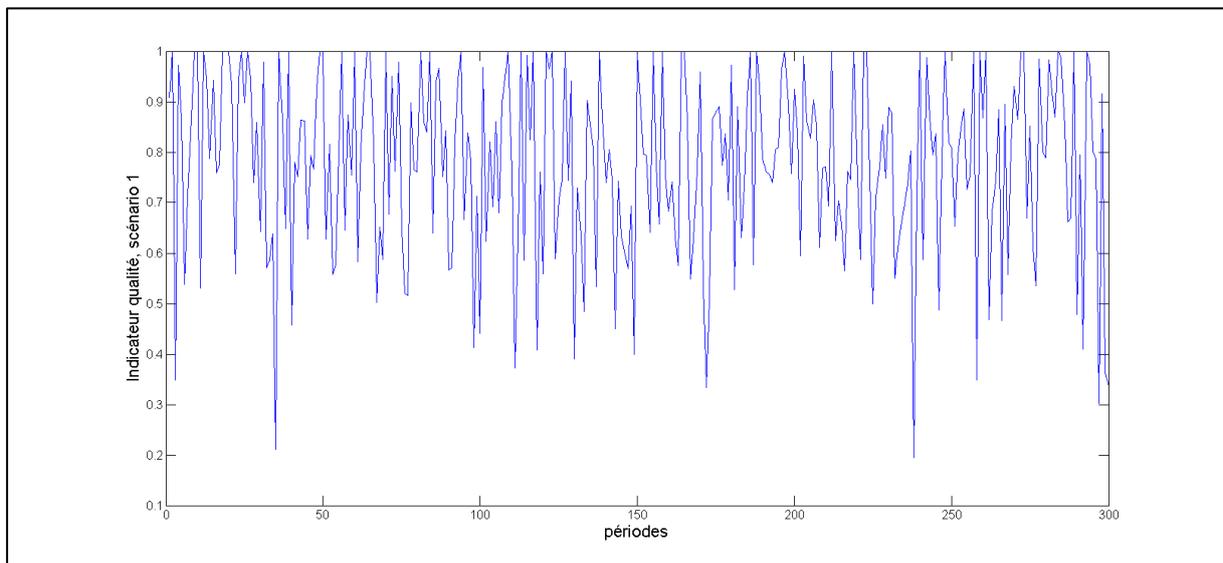


Figure 6-4: Evolution de l'indicateur de qualité selon le premier scénario.

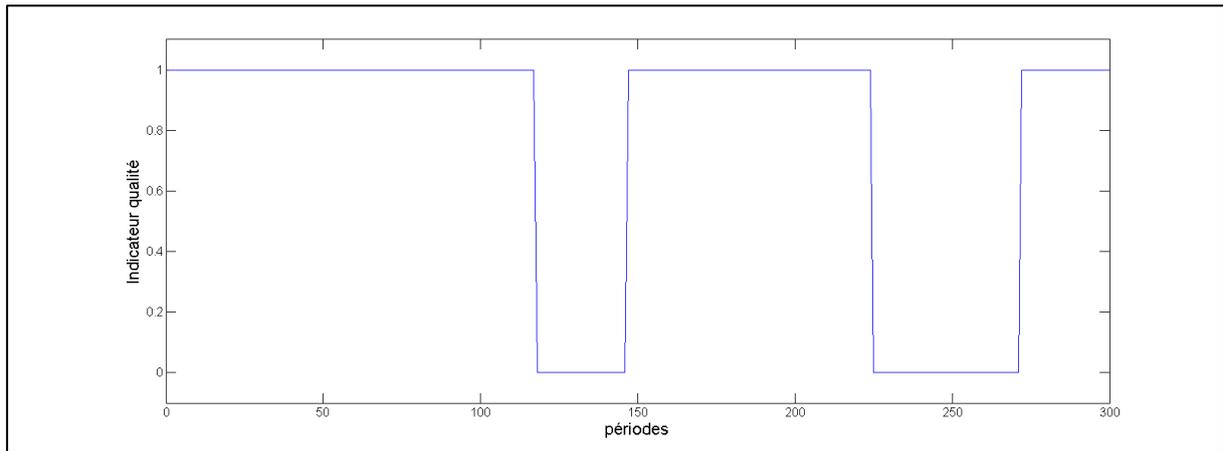


Figure 6-5 : Evolution de l'indicateur de qualité selon le deuxième scénario.

Indépendamment de scénarios, le modèle de prévision appliqué, pour l'indicateurs de qualité  $Z_t$ , est donné par l'équation (6.7).

$$\hat{Z}_t = (1 - f) * \hat{Z}_{t-1} + f * Z_{t-1} \quad (6.7)$$

Dans les deux cas, le système est stimulé avec et sans un prédicteur de qualité donné par l'équation (6.7) avec facteur d'oubli  $f = 0,55$ .

Dans la suite et pour chaque modèle de  $z_t$ , nous allons présenter la perturbation du système sans modifier la commande pour prendre en considération la variation de la qualité puis en modifiant la commande par prédiction de la perturbation de la qualité dans le but d'évaluer l'efficacité de ce prédicteur à améliorer la résilience du système. La simulation des systèmes est effectuée avec la prise en considération les contraintes de positivité et de capacité.

#### 6.4.4 Etude de vulnérabilité de la chaîne logistique avec le 1<sup>er</sup> scénario

Dans ce premier cas d'étude, nous considérons une dynamique aléatoire de l'indicateur de qualité durant toute la simulation. La valeur moyenne de la qualité est de 0,8. L'indicateur de qualité est donné par la formule (6.5) et sa dynamique est représentée par la Figure 6-4 .

### 6.4.4.1 Simulation sans la prédiction de l'indicateur qualité

Dans cette étape, les défauts de qualité ne sont pas connus et ils ne sont pas encore pris en compte lors des lancements des commandes.

La Figure 6-6 décrit l'évolution du niveau du stock calculée par l'équation (6.2), et la Figure 6-7 trace les commandes  $O_t$  lancées. Les commandes lancées se calculent avec les equations (6.3) et (6.4) sans estimation de l'indicateur qualité. En effet l'indicateur  $z_t$  est supposé égal à 1 et par suite l'indicateur  $\hat{z}_t$  est considéré égal à 1.

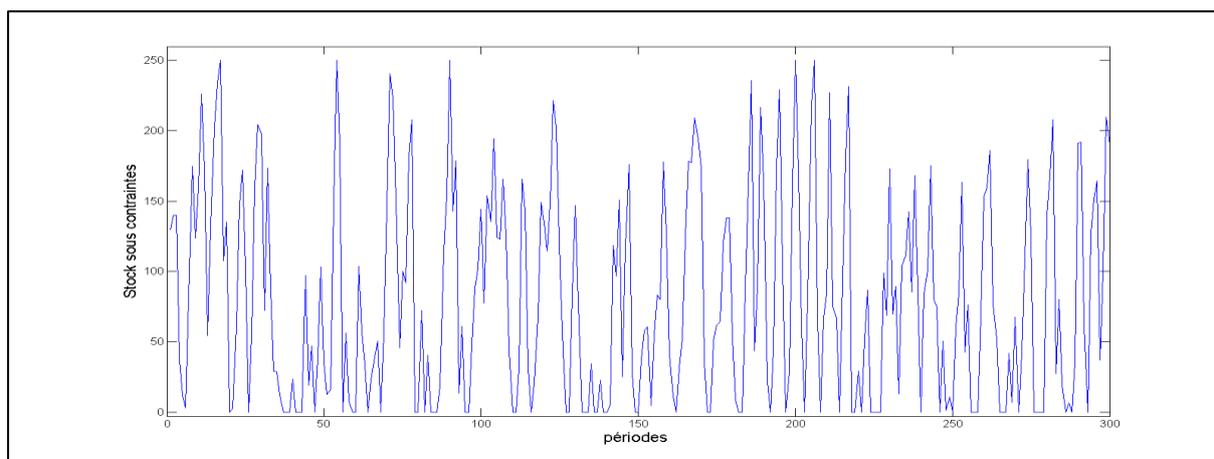


Figure 6-6 : Niveau du stock, scénario1.

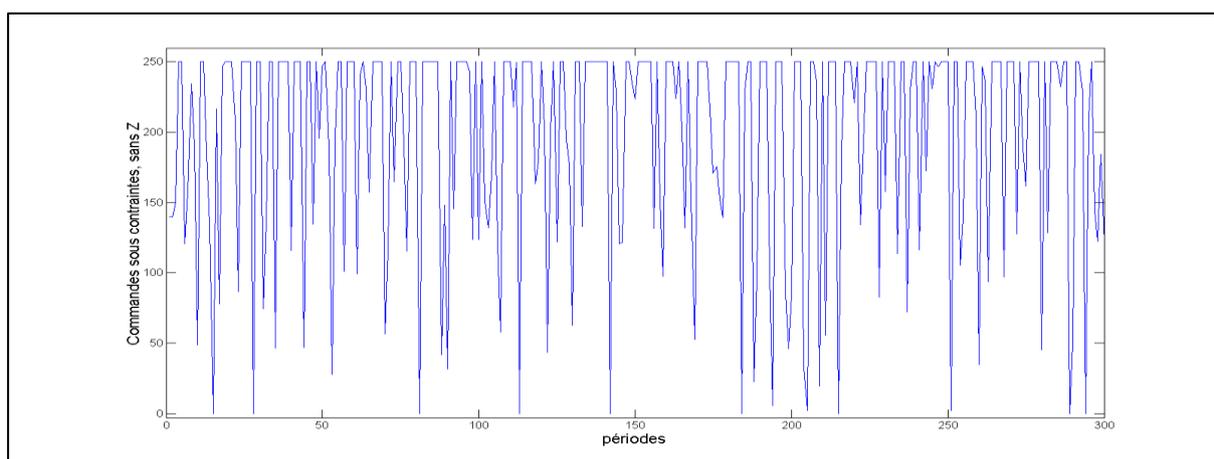


Figure 6-7 : Evolution des commandes, scénario1.

Ces figures donnent une idée que le niveau des stocks est souvent zéro. En effet la

quantité commandée pour ramener le stock à son niveau de rechargement est toujours inférieure à ce qu'il faut. Dans ce cas, l'indice des stocks prend essentiellement la valeur -1 pour indiquer que le système atteint la contrainte de positivité du stock (voir Figure 6.8).

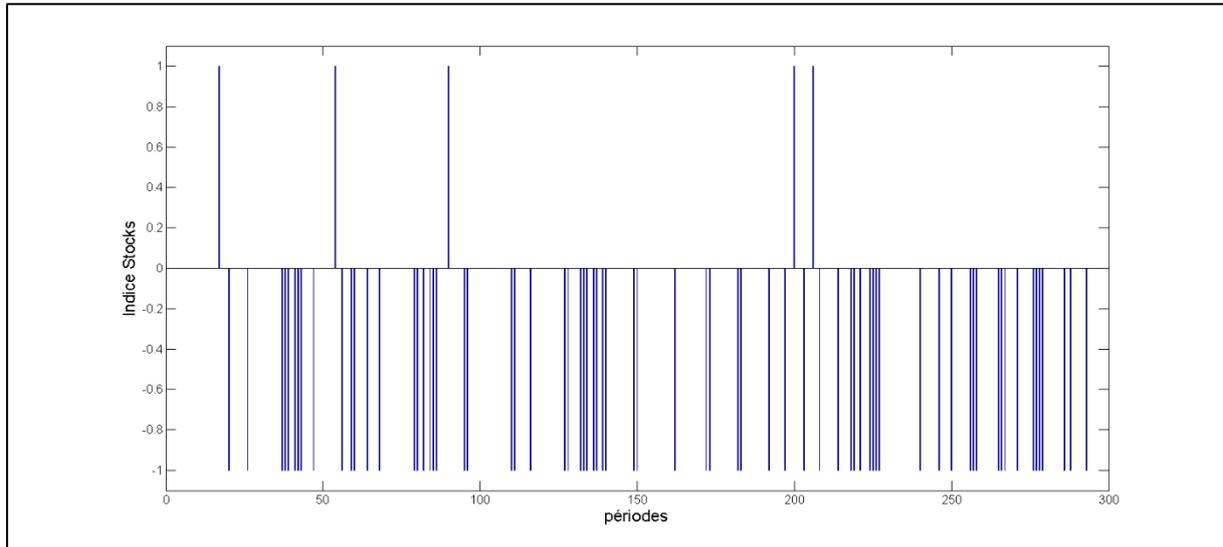


Figure 6-8 : Indices du stock, scénario 1.

Dans ce cas, la demande est supérieure à la quantité disponible en stock. A partir de l'indicateur de retard qui est présenté par la Figure 6.9, nous pouvons déduire la vulnérabilité de système au retard, engendré par la perturbation de qualité des produits reçus.

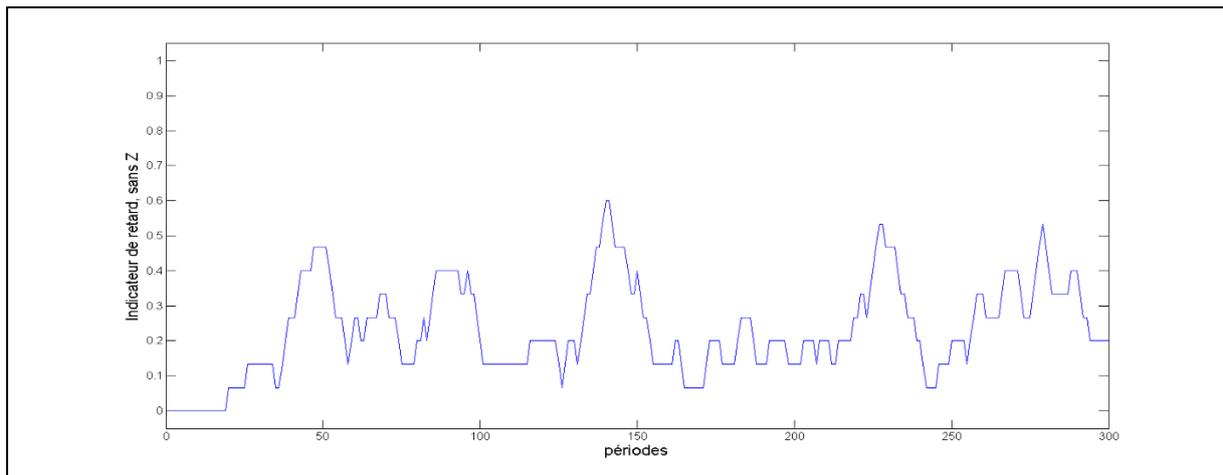


Figure 6-9 : Indicateur de retard de scénario 1, sans prise en compte de l'indicateur Z.

D'après ces résultats, il semble nécessaire de prendre en compte la perturbation de qualité dans le processus de commande.

#### 6.4.4.2 Simulation avec prédiction de l'indicateur qualité

Pour appliquer la formule (6.3) lors de calcul des commandes à lancer, l'indicateur qualité est estimé avec la formule (6.7). D'après la Figure 6.12 nous pouvons constater que ce dernier a la même moyenne que l'indicateur de qualité réel.

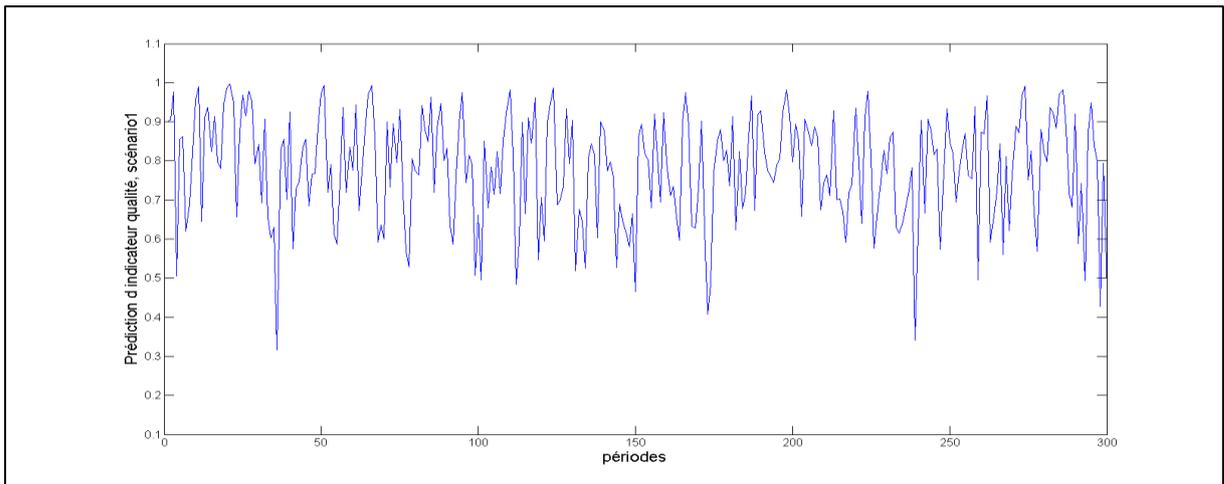


Figure 6-10 : Prédiction de l'indicateur qualité de scénario 1.

La Figure 6.11 décrit l'évolution du niveau du stock calculée par l'équation 6.2, et la Figure 6.12 concerne les commandes  $O_t$  calculée par les équations (6.3) et (6.4).

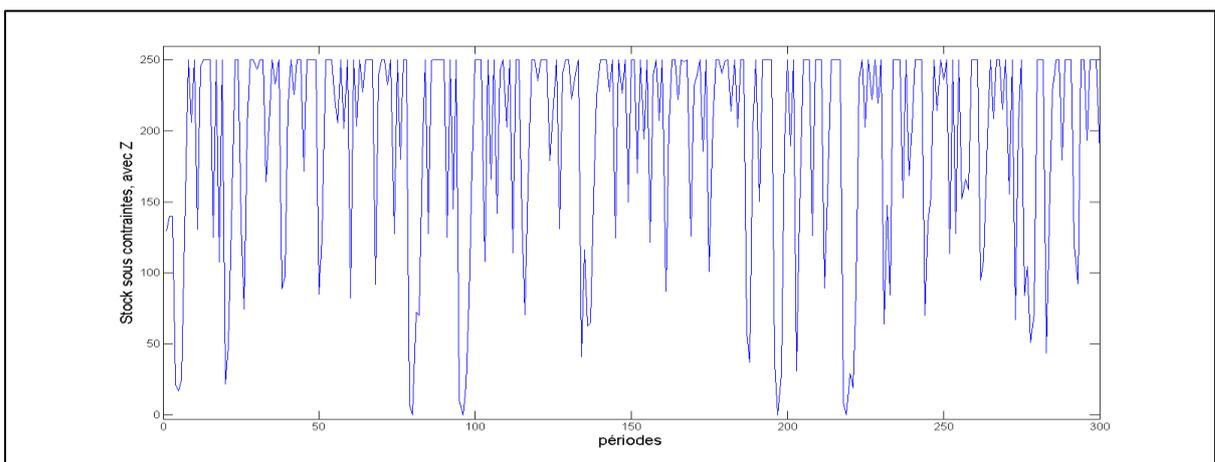


Figure 6-11: Evolution du stock avec le prédicteur de qualité , scénario 1.

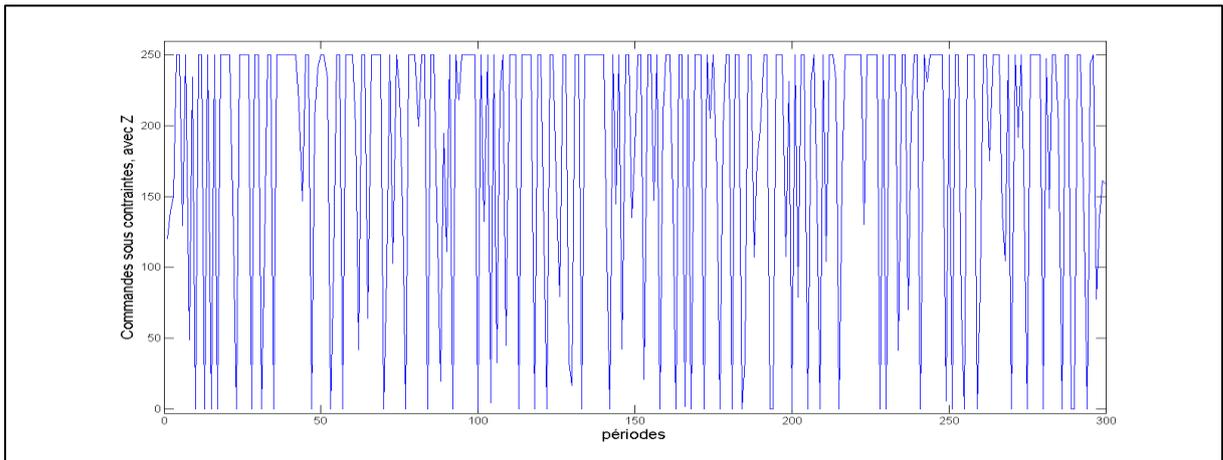


Figure 6-12: Evolution des commandes (scénario 1), avec prise en compte de la perturbation de qualité.

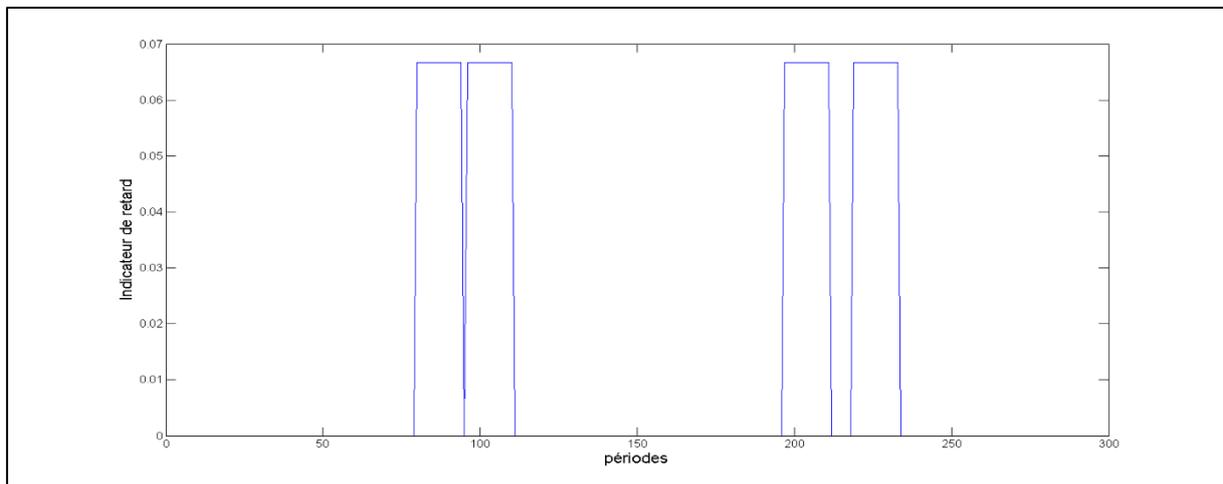


Figure 6-13: Indicateur de retard (scénario 1), avec la considération de la perturbation de qualité.

Les courbes relatives aux stocks et aux commandes, ne permettent pas de conclure sur l'intérêt de prendre en considération les perturbations de qualité (Figure 6.11 et Figure 6.12). En revanche, la comparaison entre les indicateurs de retards fournis par la Figure 6.9 et 6.13, permet de remarquer que le système a un comportement moins vulnérable lorsque nous utilisons la qualité prédite pour calculer la quantité d'ordre. Toutefois, les valeurs de commandes atteignent fréquemment le niveau de capacité de livraison comme le montre l'indicateur de limite de capacité d'approvisionnement Figure 6.14.

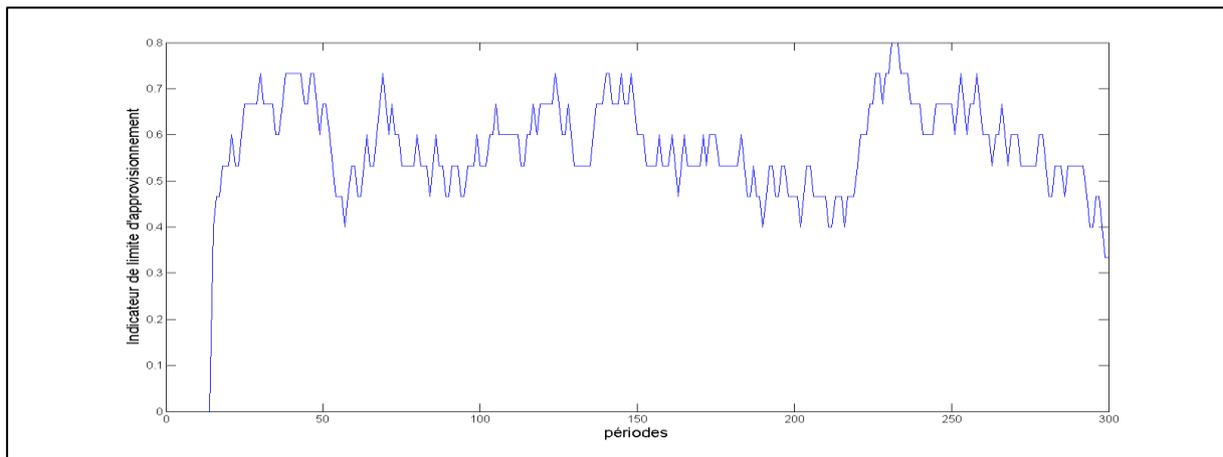


Figure 6-14: Indicateur de limite d'approvisionnement (scénario 1), avec prise en compte de perturbation qualité.

## 6.4.5 Etude de vulnérabilité de la chaîne logistique avec le 2<sup>ème</sup> scénario

Le système est maintenant simulé sous sauts aléatoires de la qualité dont la valeur est comprise entre 0 et 1 à des moments aléatoires. Comme dans l'exemple précédent, le système est en premier lieu, simulé sans la prise en compte de prédicteur de perturbation de la qualité et en second lieu, avec prise en compte du prédicteur de l'indicateur qualité.

Comme représenté dans la Figure 6.7, dans cet exemple numérique entre les dates [0, 117], [147, 224] et [262, 300], l'indicateur de qualité est à 1, en d'autres termes la qualité est reçue comme prévu au début. Au contraire, entre les dates [118, 146] et [225, 261] l'indicateur de qualité est égal à zéro. Les dates  $T1 = 117$ ,  $T2 = 146$ ,  $T3 = 224$  et  $T4 = 261$  sont calculées d'une façon aléatoire selon la loi normale.

### 6.4.5.1 Simulation sans la prédiction de perturbation de l'indicateur qualité

Dans un premier temps, nous n'allons pas tenir compte de l'indicateur de la qualité dans le calcul des commandes.

La Figure 6-15 et la Figure 6-16 ci-après, illustrent, respectivement les évolutions de niveau du stock et de la commande.

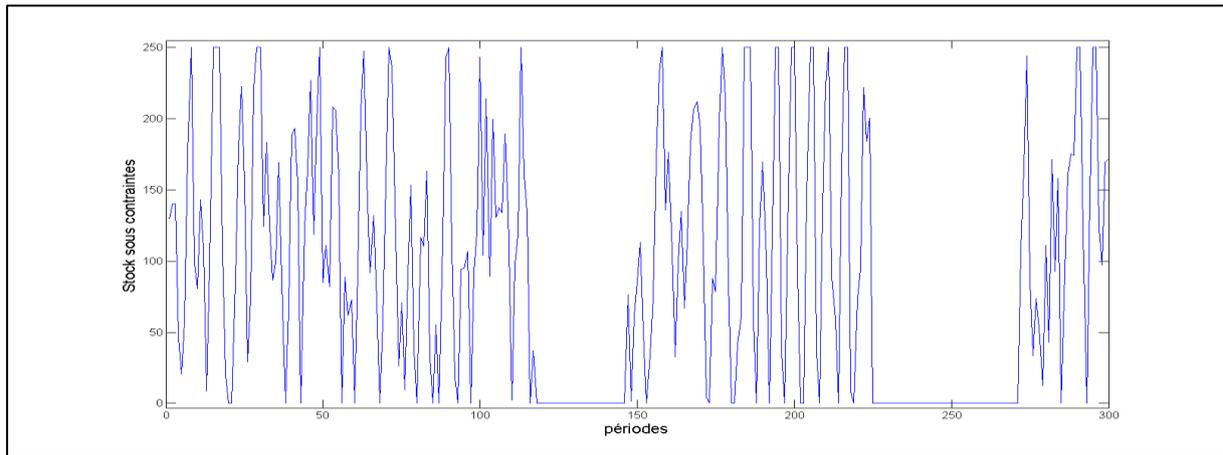


Figure 6-15: Evolution du stock sous contraintes (scénario 2), sans le prédicteur de qualité.

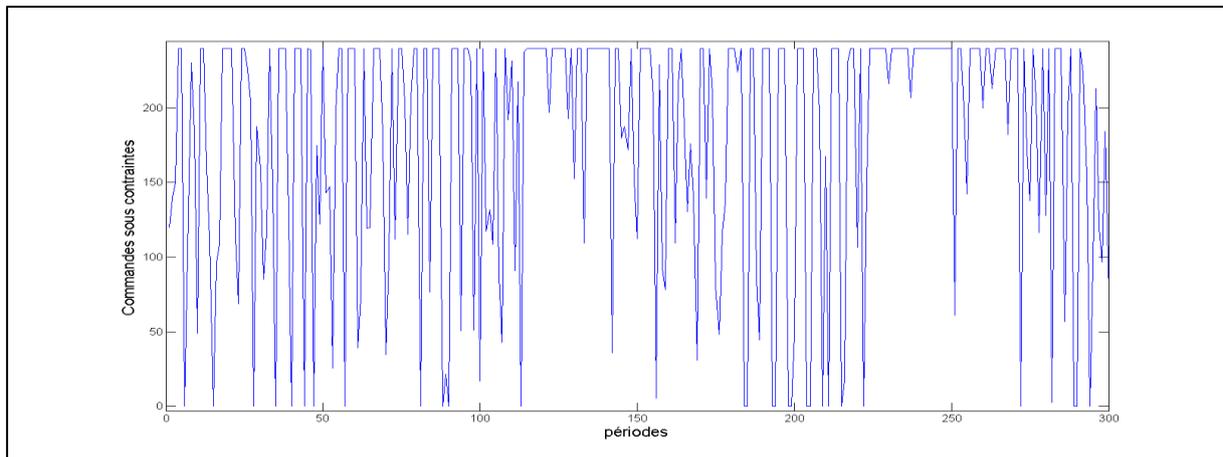


Figure 6-16 : Evolution des commandes sous contraintes (scénario 2), sans le prédicteur de qualité.

A partir de ces deux figures, il est clair que le système est en rupture du stock pendant toute la période d'interruption du côté de fournisseur. Le producteur devrait commander de plus en plus.

#### 6.4.5.2 Simulation avec prédiction de la perturbation de l'indicateur qualité

Pour introduire l'indicateur de perturbation de qualité, nous devons d'abord le prédire. Pour ce faire, nous allons utiliser pour la deuxième fois la formule (6.7).

Avec le facteur d'oubli  $f = 0,55$ , la courbe de l'indicateur estimé est très proche de l'indicateur de qualité réel (voir Figure 6-17).

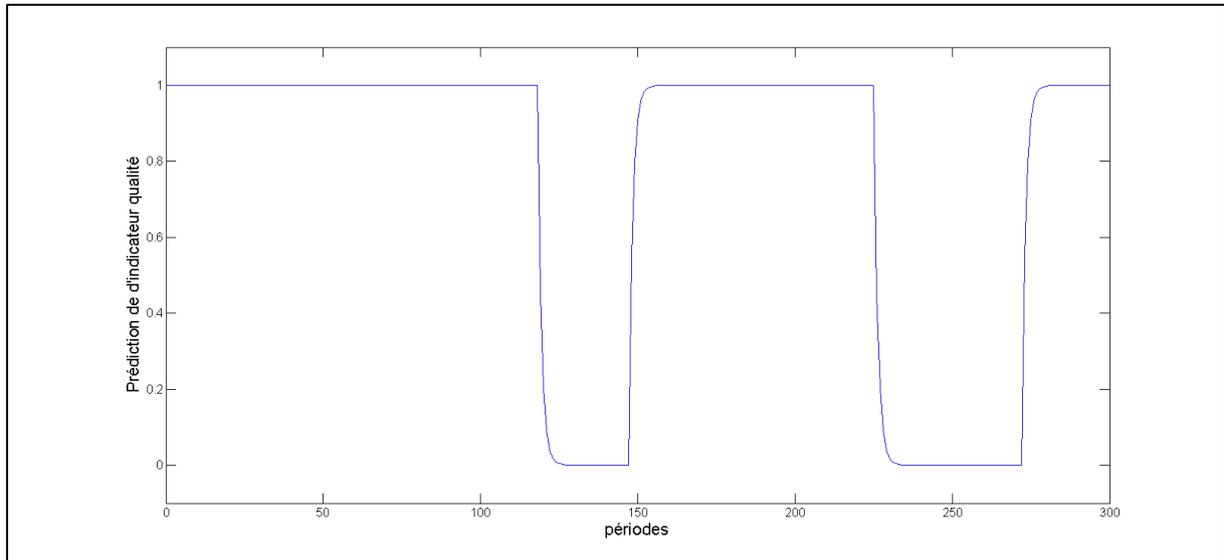


Figure 6-17 : Prédiction de l'indicateur qualité (scénario 2).

Encore une fois, on peut observer la perturbation de l'ordre et également les niveaux du stock à l'aide de la Figure 6-18 et de la Figure 6-19. En particulier, l'évolution des stocks semble avoir des perturbations autour des dates des états de changements de niveau.

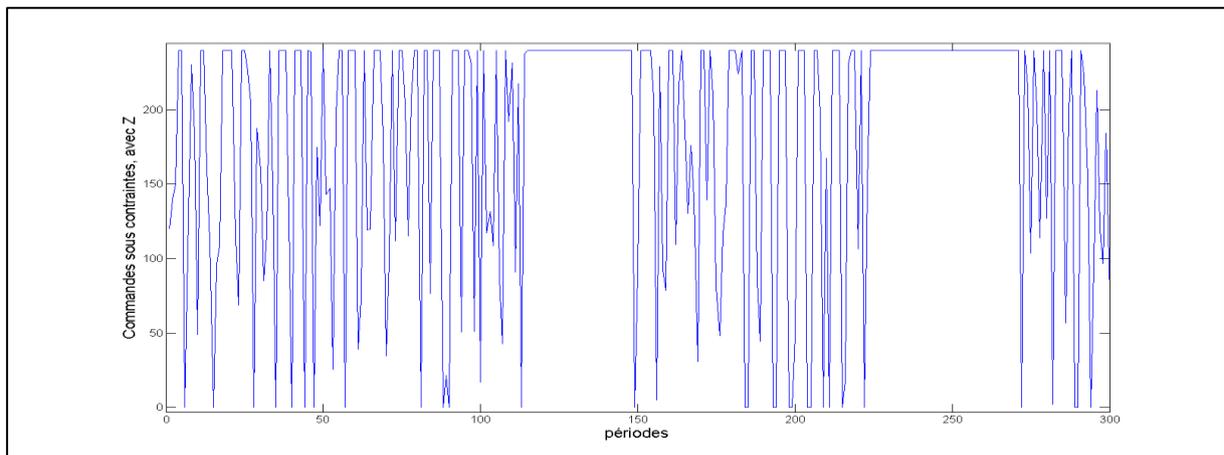


Figure 6-18: Dynamique du stock (scénario 2) avec le prédicteur de qualité.

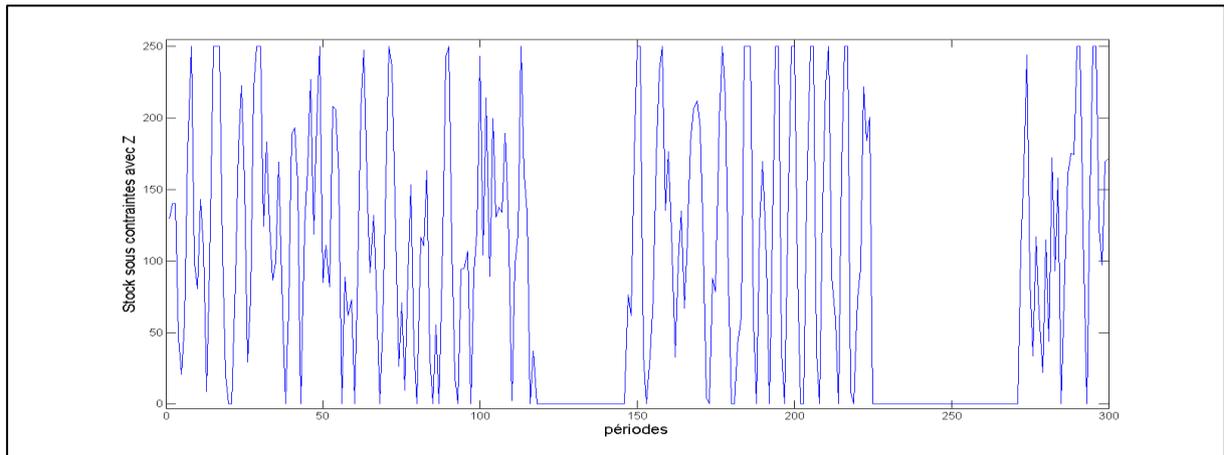


Figure 6-19: Dynamique de commandes (scénario 2) avec le prédictor de qualité.

En revanche, après la prise en compte de l'indicateur de qualité du système, le niveau de commande atteint fréquemment la valeur du seuil maximal 250 qui représente la capacité du fournisseur. Cette information est aussi montrée par l'indicateur de limite de fournisseur (Figure 6-20) qui présente une vulnérabilité du système et qui arrive à 1 dans les intervalles [118, 146] et [225, 261]. Dans cette situation, le producteur a simultanément deux problèmes: le problème de pénurie et le problème de rupture du stock.

En regardant l'allure de la courbe de retard, donnée par la Figure 6-20, et de coût, donnée par la courbe Figure 6-21, nous pouvons remarquer qu'au-delà d'une certaine valeur, il n'est pas intéressant d'augmenter encore la quantité à commander auprès de ce fournisseur, car ceci n'entraîne qu'une augmentation importante au niveau des retards et par conséquent une augmentation des coûts.

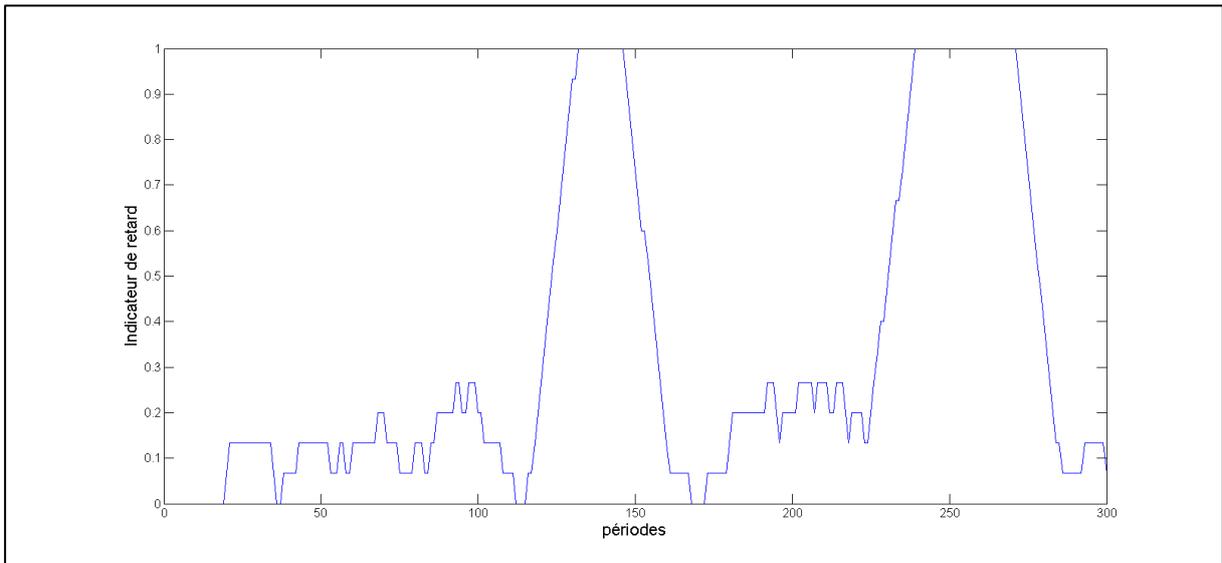


Figure 6-20 : Indicateur de retard (scénario 2) avec le prédictor de qualité.

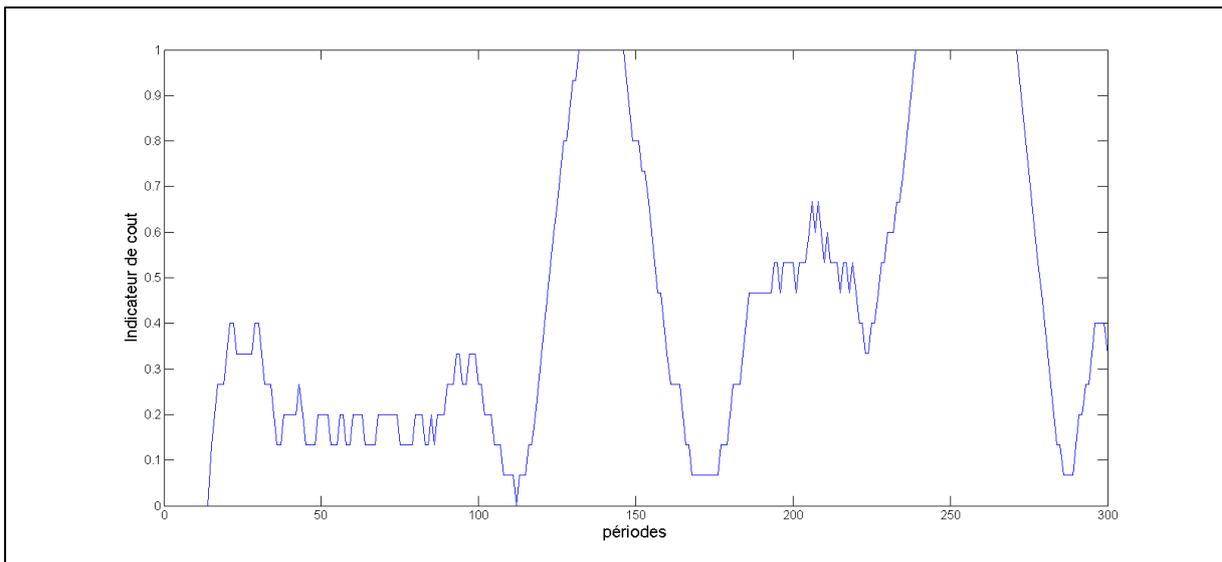


Figure 6-21 : Indicateur de coût (scénario 2) avec le prédictor de qualité.

## 6.5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté dans un premier temps une extension de notre modèle mathématique au cas de la prise en compte des perturbations liées à la qualité des produits.

Dans un deuxième temps, et pour valider ce modèle nous avons simulé un exemple d'une chaîne logistique à deux étages, pour analyser comment les variations de la qualité et de la demande peuvent affecter les fluctuations du stock et de l'ordre en prenant en compte des contraintes du système.

Dans les deux exemples étudiés, il est clair que sans la prise en compte de l'indicateur de qualité, le système se trouve souvent en forte perturbation et souvent en rupture du stock. Pour remédier à cela, nous avons estimé l'indicateur de qualité, et nous l'avons introduit pour calculer la quantité à commander. Dans ces deux exemples nous avons constaté qu'en cas de rupture de son stock, le producteur commande une quantité qui est souvent supérieure ou égale à la capacité maximale de son fournisseur.

Nous avons également utilisé des indicateurs pour étudier la vulnérabilité du système liée à la violation des contraintes de positivité de niveau du stock et à la saturation de la capacité du fournisseur.



# Conclusion Générale

Les chaînes logistiques constituées d'entreprises en réseau, qui sont dotées d'une d'autonomie décisionnelle et organisationnelle, sont confrontées à des risques de diverses sources. Les entreprises qui les composent sont particulièrement sensibles (voire vulnérables) aux perturbations locales pouvant être d'ordre social, économique, financier, environnemental, etc., qu'elles propagent souvent en les amplifiant. Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la l'évaluation des risques et des vulnérabilités dans les chaînes logistiques.

La première partie de nos travaux a été consacrée à l'étude du domaine des risques dans les chaînes logistiques en puisant dans l'analyse des travaux réalisés dans la communauté scientifique.

Le premier chapitre a présenté, en premier lieu, des notions générales sur les chaînes logistiques. En deuxième lieu, une analyse ontologique a été adoptée pour présenter une compréhension de ce domaine, à l'aide d'un modèle cognitif du domaine. En effet, un tour d'horizon des différentes visions adoptées pour définir la chaîne logistique, nous a permis de proposer un modèle cognitif, réalisant une abstraction de plusieurs modèles pratiques, issus d'une analyse des différentes définitions, en suivant la méthode KOD. Le modèle cognitif obtenu a permis de conceptualiser les caractéristiques essentielles du domaine.

Le deuxième chapitre s'est focalisé sur la compréhension des risques et des vulnérabilités en général, puis dans le domaine des chaînes logistiques en particulier. Nous avons également présenté les deux approches d'analyse de risque : l'approche probabiliste, qui s'intéresse aux probabilités d'occurrence des événements indésirables, et l'approche déterministe qui s'intéresse à évaluer les conséquences de tels événements. Un état de l'art sur la modélisation des chaînes logistiques confrontées aux risques montre l'existence de deux courants de modélisation :

- Les modèles proactifs qui interviennent dans la phase de la conception des chaînes logistiques,
- Les modèles réactifs qui supposent que la chaîne logistique est déjà opérationnelle.

A l'issue de ce chapitre, nous nous situons dans la lignée des auteurs qui ont essayé d'étudier le risque en poursuivant une approche réactive.

En dépit des évènements indésirables, deux fortes perturbations, considérées comme des phénomènes dangereux, ont été retenues en vue d'une analyse de leurs l'effet sur la performance locale et globale d'une chaîne logistique : la perturbation de flux d'information et la perturbation liée au flux physique.

Durant la deuxième partie, un cadre formel a été exposé. Le troisième chapitre traite de la modélisation des chaînes logistiques à l'aide de modèles ARIMA. Pour la compréhension de la thèse, plusieurs notions de base sur les séries chronologiques ainsi que l'algorithme de modélisation d'une chaîne logistique à l'aide d'ARIMA sont présentées. Un exemple d'une chaîne logistique dyadique a été simulé pour illustrer le comportement de la chaîne en régime nominal (linéaire), en présentant les répercussions de la fluctuation de la demande sur son comportement, connue par l'effet coup de fouet.

Dans le Chapitre 4, un modèle analytique, basé sur les modèles de Graves (1999) et de Gilbert (2005) a été proposé afin d'étudier la dynamique d'une chaîne logistique qui prend en compte l'incertitude de la demande des clients. En supposant que la chaîne logistique est une suite d'étages et en se situant au niveau du dernier étage, le modèle consiste à présenter les demandes incertaines du client final sous forme d'un processus ARIMA, à partir desquelles on peut déterminer l'approvisionnement à planifier, et le niveau de stock à la fin de chaque période.

A partir de cette représentation de la dynamique locale de dernier étage, ce modèle élémentaire peut être appliqué aux étages en amont pour avoir une visibilité sur la dynamique globale de toute la chaîne logistique, et ce, en supposant que la commande lancée par un étage représente la demande sur l'étage en amont. Le modèle proposé prend en compte les capacités de chaque étage d'une chaîne logistique. L'importance de ce modèle réside dans sa capacité à mettre en évidence, d'une part, la dépendance entre la demande incertaine des clients et les commandes à lancer ainsi que le niveau du stock de chaque étage, et d'autre part, la dépendance entre les étages d'une chaîne logistique. En outre, un modèle étendu a été proposé pour intégrer la prise en compte des contraintes de capacité et de positivité au niveau de chaque étage.

Pour étudier le comportement de la chaîne logistique en mode dégradé, des indicateurs de vulnérabilités d'une chaîne logistique sont proposés (rupture de stock, stock saturé, limite d'approvisionnement, indicateur d'une demande faible) en se référant aux domaines de performance issus du modèle SCOR. Ces indicateurs permettent d'évaluer l'effet des phénomènes dangereux sur le comportement local d'un étage et le comportement global d'une chaîne logistique, quand on dépasse les capacités du stockage ou les capacités d'approvisionnement.

Dans la troisième partie, Le modèle obtenu et les indicateurs proposés font l'objet d'une implémentation en Matlab afin de tester différents scénarios de risques. L'objectif de cette partie est d'évaluer à l'aide de la simulation, et à l'aide des indicateurs proposés, l'impact de perturbations des flux d'information et du flux physique sur la vulnérabilité du système. Les perturbations des flux d'information concernent des fluctuations importantes de la demande, tandis que les perturbations du flux physique portent sur des variations de la qualité des produits approvisionnés.

Le Chapitre 5 présente une approche d'évaluation des conséquences de fortes perturbations de la demande. Pour étudier les effets de ces perturbations sur la chaîne logistique, nous avons étudié le comportement de cette dernière en proposant de rajouter une perturbation additive à son modèle.

Au niveau du Chapitre 6, une extension du modèle a été proposée, pour prendre en compte la perturbation de la qualité des produits approvisionnés. Pour étudier les effets des fortes perturbations sur la qualité des produits reçus, nous avons étudié le comportement de la chaîne logistique par l'ajout d'une perturbation multiplicative au modèle. Nous avons également proposé un modèle permettant une meilleure résilience de la chaîne face à un tel phénomène dangereux.

## **Perspectives**

Les résultats obtenus tout au long de ce travail de thèse nous permettent de dégager plusieurs perspectives.

En ce qui concerne la chaîne logistique modélisée, la structure que nous avons utilisée, au cours de cette thèse, est une structure d'une chaîne logistique mise en série. Afin d'imiter la réalité et d'étudier le comportement d'une chaîne logistique plus complexe, en terme de nombre des intervenants, nous proposons d'augmenter le nombre des fournisseurs pour un même client, et même de considérer des chaînes logistiques en réseau.

De même, les politiques d'ordre représentées dans le modèle ARIMA sous contraintes, sont celles par niveau de rechargement (order up to) et par politique de stock nominal (base stock). Une extension possible est de prendre en considération comme modèle de base le modèle ARIMA généralisé de Gilbert (2006) pour modéliser une chaîne logistique sous contraintes, sous une forme unifiant plusieurs politiques d'approvisionnement.

En ce qui concerne les perturbations étudiées, nous avons traité celles liées à la

demande et celles liées à l'approvisionnement en produits. Nous proposons de compléter par les effets de perturbation liées à la production en considérant que les capacités de production peuvent varier de façon aléatoire.

En ce qui concerne les indicateurs, nous avons étudié l'effet de coup de fouet en régime non saturé. Nous envisageons d'étudier l'effet de coup de fouet ainsi que l'effet de coup de fouet inverse, concernant les incertitudes sur les prix de vente, avec le modèle ARIMA sous contraintes. Nous chercherons à caractériser ces effets en prenant en compte des différents contraintes de capacité et de positivité.

L'indicateur de perturbation de flux des produits reçus  $Z_t$  a été considéré relatif à la perturbation de l'indicateur qualité. Pour prendre en compte d'autres perturbations relatives aux produits reçus, nous envisageons d'étendre cette étude en proposant de considérer aussi d'autres perturbations, comme une livraison incomplète ou une livraison différée au producteur.

# Annexe 1

## 1. Présentation de la méthode d'analyse KOD

KOD s'inscrit dans la famille des méthodes de l'Ingénierie des Connaissances (ou Génie Cognitif) ayant pour but de guider l'ingénieur (ou le cogniticien) dans sa tâche d'élaboration de Systèmes à Base de Connaissances. Cette méthode a été conçue pour introduire un modèle explicite entre la formulation d'un problème en langue naturelle et sa représentation dans le métalangage formel choisi. KOD repose sur une démarche inductive qui, sur la base d'un corpus constitué de documents, d'observations et de discours d'experts, oblige à exprimer de façon explicite le modèle conceptuel des connaissances des experts (aussi appelé modèle cognitif). KOD fournit les outils d'aide à l'extraction, la modélisation et la formalisation des connaissances exprimées en langage naturel.

Les principales caractéristiques de cette méthode sont qu'elle repose sur des principes issus de la linguistique et de l'anthropologie cognitive. Ses fondements linguistiques la rendent particulièrement bien adaptée pour l'acquisition de connaissances exprimées en langage naturel. Ainsi, elle propose un cadre méthodologique pour guider la collecte des termes et les organiser à partir d'une analyse terminologique (capacité linguistique). Grâce à ses fondements anthropologiques, le cogniticien dispose d'un cadre méthodologique facilitant l'analyse sémantique de la terminologie utilisée pour produire un modèle cognitif (capacité de conceptualisation). Enfin, elle guide le travail du cogniticien depuis l'extraction de la connaissance jusqu'à l'élaboration du modèle conceptuel.

La mise en œuvre de la méthode KOD repose sur l'élaboration de trois modèles successifs : le modèle pratique, le modèle cognitif et le modèle informatique (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Chacun de ces modèles est élaboré selon trois paradigmes : <Représentation, Action, Interprétation>.

Paradigmes Modèles	Représentation	Action	Interprétation
Pratique	Représentation statique des objets : les Taxèmes	Représentation dynamique des objets actifs : les Actèmes	Inférences
Cognitif	Structuration des objets statiques suivant leurs propriétés : les Taxinomies	Structuration des objets dynamiques : les Actinomies	Schémas de raisonnement
Informatique	Classes	Méthodes	Règles

Tableau 18 : Les trois niveaux de modélisation de KOD.

Le paradigme Représentation donne à la méthode KOD sa capacité à modéliser l'univers tel que les experts le représentent. Cet univers est constitué d'objets concrets ou abstraits en interrelation. La méthode KOD fournit les outils méthodologiques pour élaborer la structure de cet univers de connaissance suivant ce paradigme. Le paradigme Action donne à la méthode KOD sa capacité à modéliser le comportement actif de certains objets qui activent « des paquets de procédures à la réception de messages » (Vogel, 1988). Ainsi, les plans d'actions conçus par des opérateurs humains, aussi bien que ceux d'opérateurs artificiels, seront modélisés dans un même format. Le paradigme Interprétation/Intention donne à la méthode KOD sa capacité à modéliser les raisonnements mis en œuvre par les experts pour interpréter des situations et projeter des plans d'action en fonction de leurs intentions (capacité à modéliser les raisonnements).

Le modèle pratique résulte de la représentation d'un discours ou d'un document exprimé dans les termes du domaine, au moyen de taxèmes (représentation statique des objets), d'actèmes (représentation dynamique des objets) et d'inférences (base du raisonnement cognitif). Le taxème est l'entité grammaticale minimale ; il est la verbalisation d'un objet ou d'une classe d'objets. L'actème est la verbalisation d'un acte ou d'une transformation ; c'est l'unité minimale de description d'une activité ou d'un comportement. L'inférence est l'acte ou le processus de tirer des conclusions logiques à partir de prémisses connues pour être vraies ou supposées comme telles. Le modèle cognitif est construit par abstraction du modèle pratique. Il est composé de taxinomies (organisation taxinomique des taxèmes), d'actinomies (organisation logique des actèmes) et de schémas d'interprétation (organisation logique des inférences). Le modèle informatique est le produit de la formalisation du modèle cognitif dans un langage formel indépendant de tout langage de programmation.

## 2.Élaboration des modèles avec KOD

La première étape de modélisation est l'élaboration des modèles pratiques  $M_{pi}$  qui consiste, sur la base d'un corpus (Figure Annexe1-1), à extraire les termes et les relations qui les lient au moyen d'une analyse terminologique de façon à constituer un langage terminologique. Les termes du langage sont classés en <taxèmes, actèmes, inférences> en accord avec les trois paradigmes de la méthode (**Erreur! Source du renvoi introuvable.**). Les taxèmes modélisent les objets et les concepts considérés par les experts du domaine. Les actèmes décrivent les activités du domaine et produisent des changements d'états au niveau des objets et des concepts. Les inférences sont les éléments atomiques grâce auxquels les experts construisent leurs raisonnements pour interpréter une situation et projeter leurs intentions d'action. À la fin de la première étape du processus de modélisation, chaque document du corpus ( $D_1, D_2, \dots, D_n$ ) est modélisé sous forme d'un Modèle Pratique ( $MP_1, MP_2, \dots, MP_n$ ) (Figure Annexe1-1). Chaque  $MP_i$  est la représentation d'un cas spécifique du problème étudié.

La deuxième étape est l'élaboration du modèle cognitif, qui s'effectue à partir des modèles pratiques et s'exprime au moyen d'un langage conceptuel basé sur la terminologie du domaine. Le processus consiste à : (i) analyser les termes synonymes et homonymes ; (ii) transformer les termes résultants en concepts et les relations lexicales en relations sémantiques. En accord avec les trois paradigmes de la méthode, le modèle cognitif est organisé en <taxinomies, actinomies, schémas de raisonnement> (Figure Annexe1-1). Les taxinomies sont le résultat de la classification des taxèmes. Elles se présentent sous forme d'une structure arborescente hiérarchique de type « sorte-de » ou « est-un » liant les concepts et les objets du domaine. Les actinomies sont le résultat d'une organisation ordonnée des actèmes définissant un plan d'action. Les schémas de raisonnement définissent une structure d'inférences modélisant le raisonnement des experts lorsqu'ils planifient leurs actions avant de les effectuer. Ainsi, le processus mis en œuvre encourage l'émergence de caractéristiques génériques et consensuelles du langage conceptuel développé durant cette deuxième étape. En effet, la résolution des problèmes de synonymie et d'homonymie favorise la dimension consensuelle et l'abstraction des modèles pratiques favorise la dimension générique du langage conceptuel.

La troisième étape porte sur l'élaboration du modèle informatique qui nécessite d'exprimer au préalable le modèle conceptuel au moyen d'un langage formel pour constituer un modèle formel. Le choix de ce langage formel dépend des propriétés du modèle conceptuel et de la méthode de résolution du problème. Il doit être adapté à la nature et à la complexité des concepts à représenter. L'opération de formalisation

consiste à intégrer les éléments du modèle conceptuel dans la définition de classes et d'objets pour constituer un modèle formel devant être utilisés pour le développement du logiciel. L'étape d'implémentation qui suit consiste à traduire le modèle formel dans un langage de programmation.

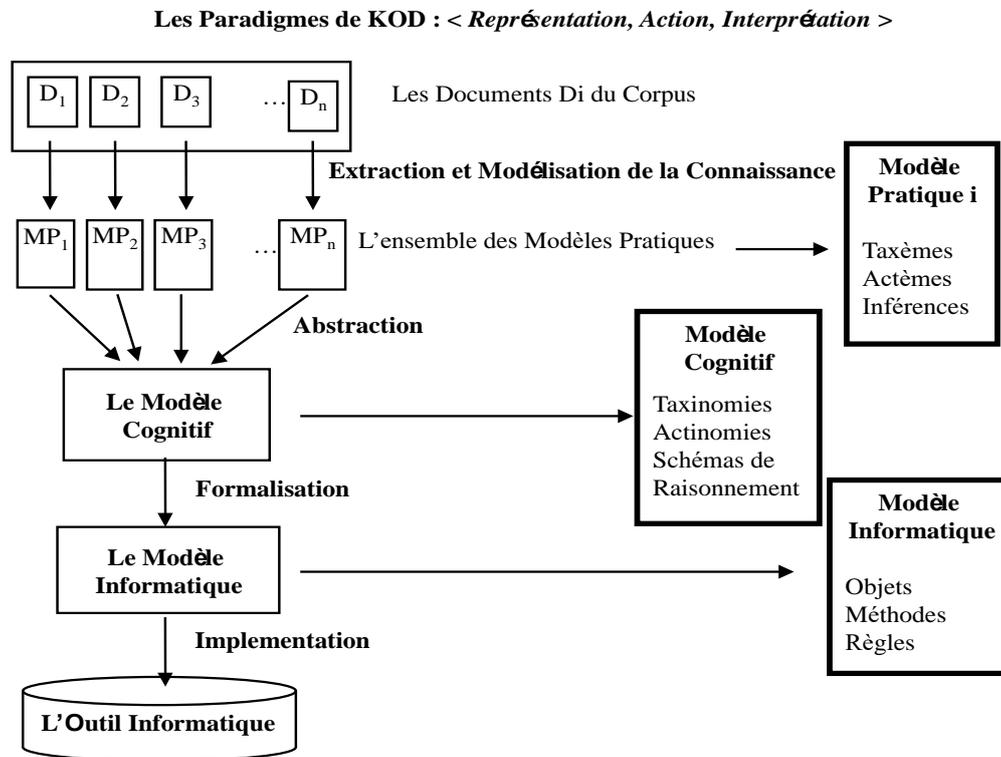


Figure Annexe1-1 : Le processus de conception d'outils logiciels d'aide à la résolution de problèmes et à la prise de décision suivant la méthode KOD.

### 3. Le cycle de vie de construction des ontologies avec KOD

Comme cela a été discuté au cours des paragraphes précédents, le développement d'ontologies peut être assimilé à une activité fondée sur la connaissance. Dans ce sens, l'utilisation de KOD semble, a priori, pertinente puisque un des objectifs d'une méthode d'ingénierie de la connaissance est d'aider, justement, à établir les connaissances d'un domaine donné. Dans ce paragraphe, nous présentons comment KOD peut être intégrée dans le processus de développement des ontologies et ainsi, faciliter la réalisation de chacune des étapes de ce processus de développement (**Erreur ! Source du renvoi**

**introuvable.).**

La projection de KOD sur la démarche générale d'élaboration d'une ontologie montre qu'elle guide la constitution du corpus (étape 2) et qu'elle fournit les outils opérationnels pour couvrir les étapes 3 (étude linguistique) et 4 (conceptualisation). De plus, les modèles obtenus sont directement formalisables au moyen d'un langage objet (étape 5). Cette méthode a déjà fait l'objet de nombreuses applications qui ont permis de valider sa pertinence pour la construction d'ontologies (Mercantini et al., 2000 ; 2003; 2004 ).

Processus d'élaboration d'ontologies	Processus KOD	Processus d'élaboration d'ontologies avec KOD
1. Spécification 2. Définition du Corpus 3. Étude Linguistique 4. Conceptualisation 5. Formalisation	1. Modèle Pratique 2. Modèle Cognitif 3. Modèle Informatique	1. Spécification 2. Définition du Corpus 3. Modèle Pratique 4. Modèle Cognitif 5. Formalisation 6. Modèle Informatique

Tableau 19 Intégration de la méthode KOD au sein du processus d'élaboration des ontologies.

# Bibliographie

- Afsarmanesh, H., et M. Shadi. «Bayesian Network-Based Risk Prediction in Virtual Organizations.» *In Working Conference on Virtual Enterprises*, October 2015: 39-52.
- Amrani, Aïcha. « Impact des contrats d'approvisionnement sur la performance de la chaîne logistique: Modélisation et simulation.» Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 2009.
- Arda, Y., et J.C. Hennet. «Inventory control in a decentralized two-stage make-to-stock queueing system.» *International Journal of Systems Science* 39, n° 7 (2008): 741-750.
- Arda, Yasemin. «Politiques d'approvisionnement dans les systèmes à plusieurs fournisseurs et Optimisation des décisions dans les chaînes logistiques décentralisées.» Thèses de doctorat, 2008.
- Arne Ziegenbein, Jan Baumgart. «Supply chain risk assessment: a quantitative approach.» 2004.
- Asbjørnslett, B. E. «Assessing the vulnerability of supply chains.» Dans *Supply Chain Risk: A Handbook of Assessment, Management, and Performance*, de George A. Zsidisin, & Bob Ritchie, édité par Springer US, 271-292. 2008.
- Aussenac Gilles N., Biébow B., et Szulman S. «Revisiting Ontology Design: a method based on corpus analysis.» *Proceedings of the 12th International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management*, EKAW-2000.
- Babai, M. Z, M M Ali, J E Boylan, et A A Syntetos. «Forecasting and inventory performance in a two-stage supply chain with ARIMA (0, 1, 1) demand: Theory and empirical analysis.» *International Journal of Production Economics*, 2013: 463-471.
- Babaï, M. Z., et A. A. Syntetos. *Dynamic Inventory Control System with Lead-time Uncertainty: Analysis and Empirical Investigation*. 2007.
- Babai, M. Z., Syntetos, A. A., Dallery, Y., & Nikolopoulos, K. (2009). Dynamic re-order point inventory control with lead-time uncertainty: analysis and empirical investigation. *International Journal of Production Research*, 47(9), 2461-2483.

- Babai, M.Z. «Politiques de pilotage de flux dans les chaînes logistiques : impact de l'utilisation des prévisions sur la gestion des stocks.» Thèse de doctorat, Laboratoire Génie Industriel, École Central Paris, 2005.
- Baglin G., Bruel O., Garreau A., Greif M., and Delft C. V. *Management Industriel et Logistique*. Edition Economica, 1996.
- Beamon, B. M. «Supply chain design and analysis: Models and methods.» *International journal of production economics* 55, n° 3 (1998): 281-294.
- Beaver, William H. «Financial ratios as predictors of failure.» *Journal of accounting research* , 1966: 71-111.
- Beck, Ulrich. «Critical Theory of World Risk Society: A Cosmopolitan Vision.» *Constellations*, 2009: 3-22.
- Benyoucef, Lyes, Xiaolan Xie, et G.a. Tanonkou. «Supply chain network design with unreliable suppliers: A Lagrangian relaxation based approach.» *International Journal of Production Research*, novembre 2013: 6435-6454.
- Berle, Ø., I. Norstad, et B. E. Asbjørnslett. «Optimization, risk assessment and resilience in LNG transportation systems.» *Supply Chain Management: An International Journal* 18, n° 3 (2013): 253-264.
- Bernoulli. « Exposition of a New Theory on the Measurement of Risk .» 1738.
- Bettis, Richard A. «Performance differences in related and unrelated diversified firms.» *Strategic Management Journal* (John Wiley & Sons, Ltd) 2 (October 1981): 379–393.
- Biteau, Raymond, et Biteau Stéphanie. *La maîtrise des flux industriels*. Éditions d'Organisation, 2003.
- Bogataj, D, et M. B. Bogataj. «Measuring the supply chain risk and vulnerability in frequency space.» *International Journal of Production Economics*, 2007: 291-301.
- Borst, P., et H. Akkermans. «An ontology approach to product disassembly.» *In International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management*, October 1997: 33-48.
- Botta-Genoulaz, V. «Principes et méthodes pour l'intégration et l'optimisation du pilotage des systèmes de production et des chaînes logistiques.» HDR, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Université Claude Bernard de Lyon 1, 2005.

- Bouchriha, H. «Faire ou faire-faire dans la conception d'une chaîne logistique: un outil d'aide à la décision.» Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2002.
- Box, G. E., G M Jenkins, et G C Reinsel. «Time series analysis: forecasting and control.» *Time series analysis: forecasting and control* (John Wiley & Sons) Vol. 734 (2011).
- Box, G.E.P., et G.M., Jenkins. « Time series analysis forecasting and control.» *Holden-Day*, 1976.
- Bradley, James R. «An improved method for managin catastrophic supply chain distruptions.» Édité par Elsevier. *Business Horizons*, 2014: 483-495.
- Butera, F. *La métamorphose de l'organisation: du château au réseau*. Les Éditions d'organisation, 1991.
- Caeymaex, F. «Risquer, gérer, sécuriser : Techniques politiques de la modernité ?» Dans *techniques et phylosophies des risques*, de C. Kermisch, & G. Hottois. Vrin, Paris, 2007.
- Caroll, J.M. «Scenario-based Design.» Chap. 17 dans *Handbook of human-computer interaction*, de M. Helander, T.K. Landauer, & P. Prabhu. Second completely revised edition, Elsevier Science B.V, 1997.
- Carvalho, H., A.P. Barroso, V.H. Machado, S. Azevedo, et V. Cruz-Machado. «Supply chain redesign for resilience using simulation.» 2012.
- Chatpattananan, V. «An ARIMA Supply Chain Model with a Generalized Ordering Policy.» 2004.
- Chen, H., L., Chu, F. Amodeo, et K. Labadi. «Performance evaluation and optimization of supply chains modelled by Batch deterministic and stochastic Petri net.» *IEEE transactions on Automation Science and Engineering*, 2005: 132-144.
- Chopra, S, et P Meindl. «Supply chain management. Strategy, planning & operation.» In *Das Summa Summarum des Management*, 2007: 265-275.
- Chopra, S, G Reinhardt, et U Mohan. «The importance of decoupling recurrent and disruption risks in a supply chain.» *Naval Research Logistics* 54, n° 5 (2007): 544-555.
- Chopra, S., et M. Sodhi. «Reducing the Risk of Supply Chain Disruptions.» *MIT Sloan Management Review*, 2014: 73-80.

- Chopra, S., et P. Meindl. «Supply Chain Management.» 2001.
- Chopra, Sunil, et M S Sodhi. «Managing risk to avoid supply-chain breakdown.» *MIT Sloan Management Review (Fall 2004)*, 2012.
- Christopher, M, et Helen Peck. «Building the resilient supply chain. .» *The international journal of logistics management* 15, n° 2 (2004): 1-14.
- Colin, Jacques. « Le supply chain management existe-t-il réellement?» *Revue française de gestion* 3 , 2005: 135-149.
- Cox, Donald F. «Risk taking and information handling in consumer behavior.» 1967.
- Craighead, Christopher W., Jennifer Blackhurst, M. Johnny Rungtusanatham, Robert B. Handfield. «The severity of supply chain disruptions: Design characteristics and mitigation capabilities.» *Decision Sciences*, 2007: 131-156.
- Cui T, Ouyang Y, Shen ZJM. «Reliable facility location design under the risk of disruptions.» *Operations Research*, 2010: 998-1011.
- Dahlgren, K. «A linguistic ontology.» 43, n° 5 (1995): 809-818.
- Dani, S. «Predicting and managing supply chain risks .» Dans *Supply Chain Risk*, 53-66. Springer US, 2009.
- Dickson, G.W. «An analysis of vendor selection.» *Journal of Purchasing* 2, n° 1 (1966): 5.
- Ellies, S.C., Henery R.M., et J. Shockley. «Buyer perceptions of supply disruption risk: A behavioral view and empirical assessment.» *Journal of Operations Management* 28, n° 1 (2010): 34-46.
- Ellram, L.M, et Cooper M.C. «Supply chain management, partnerships, and the shipper-third-party- relationship.» *The International Journal of Logistics Management* 37, n° 2 (1990): 1-10.
- Finch, P. «Supply chain risk management.» *Supply Chain Management* 9, n° 2 (2004): 183–196.
- Fischhoff, Baruch, Stephen R Watson, et Chris Hope. «Defining risk.» *Policy sciences* 17, n° 2 (1984): 123-139.
- François, Julien. «Planification des chaînes logistiques : modélisation du système décisionnel et performance.» Thèse de doctorat, Engineering Sciences, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, French., 2007.

- Gandon, F. «Ingénierie d'ontologie: une synthèse et un retour d'expérience.» *rapport de recherche*, 2002: 4396.
- Ganeshan, R, E Jack, M J Magazine, et P Stephen. «A taxonomic review of supply chain management research.» *In Quantitative models for supply chain management* (Springer US), 1999: 839-879.
- Ganeshan, R., et Harrison, T.P. «An introduction to supply chain management.» Technical report, department of Management Science and Information, The Pennsylvania State University: University Park, PA., 1995.
- Ghadge, A., S. Dani, et R. Kalawsky. «Supply chain risk management: present and future scope.» *The International Journal of Logistics Management* 23, n° 3 (2012): 313-339.
- Ghédira, Khaled. *Logistique de la production: approches de modélisation et de résolution*. Editions Technip, 2006.
- Giannakis, M. and Louis, M.,. «A multi-agent based framework for supply chain risk management.» *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2011: 23-31.
- Gilbert, K. «An ARIMA supply chain model.» *Management Science* 51, n° 2 (2005): 305-310.
- Gilbert, K C, et V Chatpattananan. «An ARIMA supply chain model with a generalized ordering policy.» *Journal of Modelling in Management* 1, n° 1 (2006): 33-51.
- Gott, A. «Empowered Engineering for the Extended Enterprise – a Management Guide.» 1996.
- Gourc, D. «Vers un modèle général du risque pour le pilotage et la conduite des activités de biens et de services: Propositions pour une conduite des projets et une gestion des risques intégrées.» Doctoral dissertation, 2006.
- Graves, S.C. «A Single-Item Inventory Model for a Nonstationary Demand Process.» *Manufacturing & Service Operations Management*, 1999: 50-61.
- Gruber, T. R. «A translation approach to portable ontology specifications.» *Knowledge acquisition*, 1993: 199-220.
- Guarino, N. «Formal ontology, conceptual analysis and knowledge representation.» *International Journal of Human-Computer Studies* 43, n° 5-6 (1995): 625-640.
- Guarino, N., et P. Giaretta. «Ontologies and knowledge bases: towards a terminological

- clarification Towards very large knowledge bases.» *N. J. I* (IOS Press), Mars 1995.
- Hallikas, J, V Virolainen, et M Tuominen. «Risk analysis and assessment in network environments: A dyadic case study.» *International Journal of Production Economics*, n° 78 (2002): 45-55.
- Hallikas, J., I. Karvina, U. Pulkkinen, V - M. Virolainen, et M. Tuominen. «Risk management process in supplier networks.» *International Journal of Production Economics* 90, n° 1 (2004): 47-58.
- Hammami, Abdelkader. *Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Université Laval: French, 2003.
- Hansson, S. O. «The Epistemology of Technological Risk.» *Techné*, 2005: 68-80.
- Hansson, S. O. «Philosophical perspectives on risk.» *Techné: Research in Philosophy and Technology*, 2004: 10-35.
- Harland, C, R Brenchley, et H Walker. «Risk in supply networks.» *Journal of Purchasing and Supply management* 9, n° 2 (2003): 51-62.
- Haywood, MARK. « An investigation into supply chain vulnerability management within UK aerospace manufacturing supply chains. .» MSc thesis, Cranfield University, 2002.
- Hennet, J.C. «A bimodal scheme for multi-stage production and inventory control.» *Automatica* 39 (2003): 793-805.
- Hennet, Jean Claude, Jean Marc Mercantini, et Isabelle Demongodin. «Toward an integration of risk analysis in supply chain assessment.» 2008. 255-260.
- Hennet, Jean-Claude, et Jean-Marc Mercantini. «Modeling and evaluation of vulnerabilities in a supply chain.» 2010: 10-12.
- Hnaïen, Faïcel. «Gestion des stocks dans des chaînes logistiques face aux aléas des délais d'approvisionnements.» Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2008.
- Ho, D. C., K. F. Au, et E. Newton. «Empirical research on supply chain management: a critical review and recommendations.» *International Journal of Production Research* 40, n° 17 (2002): 4415-4430.
- Ho, W., T. Zheng, H. Yildiz, et S. Talluri. «Supply chain risk management: a literature

- review.» *International Journal of Production Research*, 2015: 5031-5069.
- Huang, G Q, J S Lau , et K L Mak. «The impacts of sharing production information on supply chain dynamics: a review of the literature.» *International Journal of Production Research* 41, n° 7 (2003): 1483-1517.
- Hult, G. T. M., C. W. Craighead, et D. J. Ketchen Jr. « Risk uncertainty and supply chain decisions: A real options perspective.» *Decision Sciences*, 2010: 435-458.
- Igoulalene Idris, Lyes Benyoucef, Manoj Kumar Tiwari. «Novel hybrid fuzzy multi-criteria group decision making approaches for the strategic supplier selection problem.» *Expert systems with Applications* 42 (mai 2015): 3342-3356.
- ISO2009. s.d. <http://www.iso.org>.
- Ivanov Dmitry, Alexandre Dolgui, Boris Sokolov. «Supply Chain Design With Disruption Considerations: Review of Research Streams on the Ripple Effect in the Supply Chain.» *Preprints of the 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM 2015*, May 2015.
- Ivanov, D., B. Sokolov, et A. Dolgui. «The Ripple effect in supply chains: trade-off 'efficiency-flexibility-resilience' in disruption management.» *International Journal of Production Research* 52, n° 7 (2014): 2154-2172.
- Ivanov, D., et B. Sokolov. «Dynamic supply chain scheduling.» *Journal of Scheduling* 15, n° 2 (2012): 201-216.
- Ivanov, D., Sokolov B., et A. Pavlov. «Dual problem formulation and its application to optimal re-design of an integrated production-distribution network with structure dynamics and ripple effect considerations.» *International Journal of Production Research* 51, n° 18 (2013): 5386-5403.
- Ivanov, Dmitry, et Sokolov Boris . *Adaptive supply chain management*. Springer Science & Business Media, 2009.
- Jemai, Zied. «Modèles stochastiques pour l'aide au pilotage des chaines logistiques : l'impact de la décentralisation.» Thèse de doctorat, 2003.
- Johnson, M. Eric. «Learning from toys: Lessons in managing supply chain risk from the toy industry.» *California Management Review*, 2001: 106-124.
- Jüttner, U. «Supply chain risk management: Understanding the business requirements from a practitioner perspective.» *The International Journal of Logistics Management* 16, n° 1 (2005): 120-141.

- Juttner, Utta, Helene Peck, et M Christopher. «Supply chain risk management: outlining an agenda for future research.» *International Journal of Logistics: Research and Applications* 6, n° 4 (2003): 197-210.
- Kajüter, Peter. «Risk Management in Supply Chains .» *Strategy and Organization in Supply Chains* , 2003: 321-336.
- Kallel, Omar. *L'impact des relations contractuelles entre donneurs d'ordres et sous-traitants sur la performance d'une chaîne logistiqu.* Thèse de doctorat., 2012.
- Kaplan, S., et B.J Garrick. «On the quantitative definition of risk, Risk Analysis.» 1981: 11–27.
- Kermisch, C. (2011). *Le concept du risque. De l'épistémologie à l'éthique.* Paris: Editions Tec and Doc, Lavoisier.
- Kleindorfer, P. R., et G. H Saad. «Managing disruption risks in supply chains.» *Production and operations management* 14, n° 1 (2005): 53-68.
- Kleindorfer, P. R., et G. H. Saad. «Managing disruption risks in supply chains.» *Production and operations management* 14, n° 1 (2005): 53-68.
- Klibi, W., A., Martel, et A Guitouni. «The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review.» *European Journal of Operational Research* 203, n° 2 (2010): 283–293.
- Kraljic, P. «Purchasing must become supply management.» *Harvard business review* 61, n° 5 (1983): 109-117.
- Kumar, S. K., et M. K. Tiwari. «Supply chain system design integrated with risk pooling.» *Computers & Industrial Engineering* 64, n° 2 (2013): 580-588.
- Kut , C So, et Zheng Xiaona. «Impact of supplier's lead time and forecast demand updating on retailer's order quantity variability in a two-level supply chain.» *Int. J. Production Economics* 86 (2003): 169–179.
- La Londe, B. J. «Supply chain management: myth or reality?» *Supply Chain Management Review* 1, n° 1 (1997): 6-7.
- La Londe, B.J, et Masters J.M. «Emerging logistics strategies: Blueprint for the next century.» *International Journal of Physical distribution and Logistics Management.* (Emerging logistics strategies:) 24, n° 7 (1994): 35-47.
- Labadi, Karim. «Contribution à la modélisation et à l'évaluation de performances des

- systèmes logistiques à l'aide d'un nouveau modèle de réseaux de Petri stochastiques.» 2009.
- Labarthe, O., Espinasse B., Ferrarini A., et Montreuil B. «Toward a methodological framework for agent-based modeling and simulation of supply chains in a mass customization context.» *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2005: 113-136.
- Labarthe, Olivier. *Modelisation et simulation orientées agents de chaînes logistiques dans un contexte de personnalisation de masse : modèles et cadre méthodologique*. Thèse de doctorat, 2006.
- Lahmar, A., F. Galasso, H. Chabchoub, et J. Lamothe. «Towards an Integrated Model of Supply Chain Risks: An Alignment Between Supply Chain Characteristics and Risk Dimension.» Dans *Risks and Resilience of Collaborative Networks*, 3-16. Publishing, Springer International, 2015.
- Lambert, D. M., S. J. García-Dastugue, et K. L. Croxton. «An evaluation of process-oriented supply chain management frameworks.» *Journal of business Logistics* 26, n° 1 (2005): 25-51.
- Lambert, D.M. «Supply chain management: processes, partnerships, performance.» *2nd ed., Supply chain Management Institute, Sarasota, FL*. 2006.
- Lauras, M., Parrod N. Telle O., Thierry C., et J Lamothe. «Référentiel de l'entente industrielle : 3 approches dans le domaine de la gestion des chaînes logistiques.» *5ème Congrès International de Génie Industriel*, octobre 2003.
- Lavastre, Olivier, et Alain Spalanzani. «Comment gérer les risques liés à la chaîne logistique? Une réponse par les pratiques de SCRM.» 2010.
- Lawrence, T. B., M. Velimis, C. Picardal, et K. Iftexharuddin. «Risk Management and System Engineering Discipline.» *IEEE Aerospace and Electronics Conference Proceedings*, 1996: 829-835.
- Lee, H L, V Padmanabhan, et S Whang. «Information distortion in a supply chain: the bullwhip effect.» *Management science* 50, n° 12\_supplement (2004): 1875-1886.
- Lee, H. L., et M., Wolf. «Supply chain security without tears.» *Supply Chain Management Review* 7, n° 1 (2003): 12-20.
- Lee, H. L., K. C. So, et C. S. Tang. «The value of information sharing in a two-level supply chain.» *Management science*, 2000: 626-643.
- Lee, H.L., et C. Billington. «Material management in decentralized supply chain.»

- Operations Research* 41, n° 5 (1993).
- Lee, H.L., V. Padmanabhan, et S Wang. «The bullwhip effect in supply chains.» *Sloan Management Review*, 1997, éd. Spring: 93-102.
- Lee, H.L., V. Padmanabhan, et W. Seungjin. «Information distorsion in a supply chain: The bullwhipeffect.» *Management Science*, 1997: 546 – 558.
- Lee, Y.H., Cho M.K., Kim S.J., et Kim Y.B. «Supply chain simulation with discrete continuous combined modelling.» *Computer and Industrial Engineering*,, 2002: 375-392.
- Li, J., J. Chen, et S. Wang. *Risk management of supply and cash flows in supply chains* . Vol. 165. Springer Science & Business Media, 2011.
- Lin, F. R., et M. J. Shaw. « Reengineering the order fulfillment process in supply chain networks.» *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 10, n° 3 (1998): 197-229.
- Liu, Piede, et Wang Tongjuan. «Research on risk evaluation in supply chain based on grey relational method.» *Journal of computers* 3, n° 10 (October 2008): 28-35.
- Longo, F., et G. Mirabelli. «An advanced supply chain management tool based on modelling and simulation.» *Computers & Industrial Engineering*. 2008. 570-588.
- Lummus, R.R, et R.J. Vokurka. «Defining supply chain management: a historical perspective and practical guidelines.» *Industrial Management & Data Systems*, 2004: 11-17.
- Mahjoub, S., et J. C. Hennet. « A quadratic production game for multistage supply chains.» *International Working Seminar on Production Economics.17th (3), Innsbruck, Austria*, 2012: 149-161.
- Mahmoudi, Jaouher. «Simulation et gestion des risques en planification distribuée de chaînes logistiques : Application au secteur de l'électronique et des télécommunications.» Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et l'Espace, 2006.
- Manuj, I, et J T Mentzer. «Global supply chain risk management.» *Journal of Business Logistics* 29, n° 1 (2008): 133-155.
- March, James G., et Zur Shapira. «Managerial Perspectives on Risk and Risk Taking.» *Management Science*, Nov 1987: 1404 - 1418.
- Maria, A. «Introduction to modeling and simulation.» *In Proceedings of the 29th conference*

- on *Winter simulation*, December 1997, éd. IEEE Computer Society: 7-13.
- Mason-Jones, Rachel, et Denis R, Towill. «Shrinking the Supply Chain Uncertainty Circle.» *IOM Control* 24, n° 7 (1998): 17-22.
- Mentzer, J.T, et al. «Defining the supplychain Management.» *Journal of Business logistics* 22, n° 2 (2001): 1-25.
- Mercantini J.-M., Turnell M.F.Q.V, Guerrero C. V.S, Chouraqui E., Vieira F.A.Q., Pereira M.R.B., «Human centred modelling of incident scenarios.» *International Conference on Systems, Man & Cybernetics*, 10-13 October 2004: 893-898.
- Mercantini, J. M. «Construction d'ontologies pour la résolution de problèmes de sécurité: Une étape vers l'ontologie du Risque .» 2008.
- Mercantini, J.-M., R Loschmann, et E. Chouraqui. «A provisional analysis method on safety of an urban industrial site.» *Safety in the Modern Society, People and Work Research Report*, 2000: 105- 109.
- Mercantini, J.M., L. Capus, E. Chouraqui, et N. Tourigny. «Knowledge engineering contributions in traffic road accident analysis.» Dans *Innovations in Knowledge Engineering*, de A. Abraham, C. Faucher, B. Jan van der Zwaag R. Jain, 211-244. 2003.
- Mercantini, Jean-Marc, Nicole Tourigny, et Eugène Chouraqui. «Élaboration d'ontologies à partir de corpus en utilisant la méthode d'ingénierie des connaissances KOD.» *1ère édition des Journées Francophones sur les Ontologies (JFO 2007)*, 18-20 Octobre 2007: 195-214.
- Merzouk, Salah Eddine. «Problème de dimensionnement de lots et de livraisons: Application au cas d'une chaîne logistique.» Thèse de doctorat, 2007.
- Meyr, H., et H. Stadler. «Types of supply chains.» Dans *Supply chain management and advanced planning* , 65-80. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- Miller, T.C. «Hierarchical Operations and Supply Chain Planning, Springer, London, UK (2001).» s.d.
- Milliken, F. J. (1987). Three types of perceived uncertainty about the environment: State, effect, and response uncertainty. *Academy of Management review* 12, n° 1 (s.d.): 133-143.
- Min, H., et G. Zhou. «Supply chain modeling: past, present and future.» *Computers & Industrial Engineering* 43 (2002): 231-249.

- Monteiro, T. «Conduite distribuée d'une coopération entre entreprises: le cas de la relation donneurs d'ordres–fournisseurs.» Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2001.
- Mouloua, Zerouk. «Ordonnancements coopératifs pour les chaînes logistiques.» Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2007.
- Müller, M. «The Use of Information Technologies in Supply Chains–A Transaction Cost Analysis.» *Strategy and Organizations in Supply Chains*, 2003: 17-30.
- Mustapha, Karam. «Un cadre méthodologique et une architecture logicielle orientés agents pour la modélisation et la simulation organisationnelles de chaînes logistiques.» 2011.
- Muth, J. F. « Optimal properties of exponentiallyweightedforecasts.» *Amer. Statist. Association J.*, 1960: 299–306.
- Mylopoulos, J. «Conceptual modeling and telos.» Dans *Conceptual Modeling, Databases, and CASE: An Integrated View of Information Systems Development*, de R. Zicari P. Loucopoulos, édité par New Yor John wiley and Sons Inc. 1992.
- Norrman, Andreas, et Lindroth Robert. «Categorization of supply chain risk and risk management.» *Supply chain risk* , 2004: 14-27.
- Noyel, M, P Thomas, A Thomas, et P Charpentier. «Combinaison d'indicateurs pour évaluer la perturbation des flux dans les ateliers à fort taux de reprises.» *10ème Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation MOSIM'14*, 2014.
- Ohbyung, K., Ghi, P.I., Lee, K.C. «MACE-SCM: A multi-agent and case based reasoning collaboration mechanism for supply chain management under supply and uncertainties.» *Expert Systems with Applications*, 2007: 690-705.
- Paché, G., et A. Spalanzani. *La gestion des chaînes logistiques multi-acteurs : perspectives stratégiques*. Grenoble: Presses universitaires de Grenoble, 2002.
- Peck, H. «Drivers of supply chain vulnerability: an integrated framework.» *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 35 (2005): 210-232.
- Peck, H. «Reconciling supply chain vulnerability, risk and supply chain management.» *International Journal of Logistics: Research and Applications* 9, n° 2 (2006): 127–142.
- Petrovic, D., R. Roy, et R. Petrovic. « Modelling and simulation of a supply chain in an

- uncertain environment.» *European Journal of Operational Research* 109, n° 2 (1998): 299-309.
- Pettit, T.J., K.L. Croxton, et J. Fiksel. «Ensuring supply chain resilience: Development and implementation of an assessment tool.» *Journal of Business Logistics* 34 , n° 1 (2013): 46-76.
- Pfohl, H. C., H. Köhler, et D. Thomas. «State of the art in supply chain risk management research: empirical and conceptual findings and a roadmap for the implementation in practice.» *Logistics Research*, 2010: 33-44.
- Pieret, Julien. «Épistémologie du risque: la troisième voie d'Ulrick Beck et son influence sur la doctrine environnementaliste.» s.d.
- Pirard, F. «Une démarche hybride d'aide à la décision pour la reconfiguration et la planification stratégique des réseaux logistiques des entreprises multi-sites". ,.» Thèse de Doctorat, Facultés Universitaires Catholiques de Mons, Belgique, 2005.
- Poirier, C. C., et S. E. Reiter. *La supply chain: optimiser la chaîne logistique et le réseau interentreprises*. Dunod, 2001.
- Ponomarov, S. Y., et M. C. Holcomb. «Understanding the concept of supplychainresilience.» *The International Journal of Logistics Management*, 20 (2009): 124-143.
- Rao, S., et T. J. Goldsby. «Supply chain risks: a review and typology.» *The International Journal of Logistics Management* 20, n° 1 (2009): 97-123.
- Rescher, N. *A philosophical introduction to the theory of risk evaluation and measurement*. 1983.
- Ritchie, B., et G. A. Zsidisin. *Supply Chain Risk: A Handbook of Assessment, Management, and Performance*. 2009.
- Rong, Ying, Snyder Lawrence V., et Zuo-Jun Max Shen. «Bullwhip and reverse bullwhip effects under the rationing game.» *Available at SSRN 1240173*, 2008.
- Rota, K. «Coordination temporelle de centres gérant de façon autonome des ressources-application aux chaînes logistiques intégrées en aéronautique.» Thèse de Doctorat, France, 1998.
- Sakli, Leïla, Jean Claude Hennet, et Jean Marc Mercantini. «An Analysis of Risks and Vulnerabilities in Supply Networks.» IFAC Proceedings Volumes 2014 : 8933-8938.

- Sakli, Leila, Jean Claude Hennes, et Jean Marc Mercantini. «Impact of Changes in Quality of Deliveries on the Vulnerability of Supply Chains.» Dans *Risks and Resilience of Collaborative Networks*, 578-587. Springer International Publishing, 2015.
- Sambandam, N. «Managing Uncertainty in Supply Chain Operations.» *Logistics and Supply Chain Management*, Aug 2001: 141.
- Samii, A.K. *Stratégies logistiques, fondements, méthodes, applications*. Paris: Dunod, 389 p, 2001.
- Schmitt, A.J., et M. Singh. «A quantitative analysis of disruption risk in a multi-echelon supply chain.» *International Journal of Production Economics* 139, n° 1 (2012): 23-32.
- Sheffi, Y., et J.B. Rice. «A supply chain view of the resilient enterprise.» *MIT Sloan Management Review* 47, n° 1 (2005): 41-48.
- Sheffi, Yossi. «Supply chain management under the threat of international terrorism.» *The International Journal of logistics management* 12, n° 2 (2001): 1-11.
- Simchi-Levi D, Kaminsky P, et Simchi-Levi E. «Designing and Managing the Supply Chain : concepts, strategies, and case studies.» *Irwin McGraw-Hill*. USA, 2003.
- Simchi-Levi, D., P. Kaminsky, et E. Simchi-Levi. «Designing and managing the supply chain. Concepts, strategies, and case studies. » *second ed., Boston.,* 2003.
- Simchi-Levi, D., X. Chen, et J. Bramel. «The Logic of Logistics: Theory, Algorithms, and Applications for Logistics and Supply Chain Management.» 2004.
- Singhal, P., G. Agarwal, et M. L. Mittal. «Supplychainrisk management: review, classification and future research directions.» *International Journal of Business Science and Applied Management* 6, n° 3 (2011): 15-42.
- Sitkin, S.B., et A.L Pablo. «Reconceptualizing the determinants of risk behavior.» *Academy of Management Review*, 1992: 9–38.
- Slutzky, E. «The summation of random causes as the source of cyclic processes.» *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1937: 105-146.
- Stadtler, H., et Kilger C. *Supply Chain Management and Advanced Planning*, 2000, éd. Springer, Heidelberg.
- Starr, C., R. Rudman, et C. Whipple. «Philosophical basis for risk analysis.» *Annual review of energy*, 1976: 629-662.

- Sterman, J. D. «Modeling managerial behavior: misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment.» *Manage.Sci* 35, n° 3 (1989): 321-339.
- Stirling, A. «Risk, precaution and science : towards a more constructive policy debate.» *EMBO reports*, 2007: 309-315.
- Sunil Chopra, G Reinhardt, et U Mohan . «The Importance of Decoupling Recurrent and Disruption Risks.» *Naval Research Logistics* 54, n° 5 (2007): 544-555.
- Tang, C.S. «Perspective in supply chain risk management.» *Int. J. Production Economics* 103, n° 3 (2006a): 451-488.
- Tang, C.S. «Robust Strategies for mitigating supply chain disruptions.» *International Journal of Logistics: Research and Applications* 9, n° 1 (2006b): 33-45.
- Tang, Ou, et S Nurmaya Musa. «Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management.» *International Journal of Production Economics* 33 (2010): 25-34.
- Tayur, S, R Ganeshan, et M Magazine. «Quantitative models for supply chain management.» *Kluwer Academic Publishers*, 1999.
- Thierry, C, et G. Bel. «Gestion de chaînes logistiques dans le domaine aéronautique : outils d'aide a la décision pour l'amélioration du partenariat.» *Revue Française de Gestion Industriel*, 2002.
- Thierry, C. «Gestion de chaînes logistiques, Modèles et mise en oeuvre pour l'aide à la décision à moyen terme.» Mémoire HDR, Université Toulouse 2 Le Mirail, 2003.
- Thierry, C., Thomas, A. et Bel, G. *Simulation for Supply Chain Management*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc, 2008.
- Tounsi, Jihène. «Modélisation pour la simulation de la chaîne logistique globale dans un environnement de production PME mécatroniques.» Thèse de doctorat, 2009.
- Towill, D.R. «The impact of business policy on bullwhip induced risk in supply chain management.» *Int. Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 35, n° 8 (2005): 555-575.
- Treuil, J.P, A Drogoul, et J D Zucker . «Modélisation et simulation à base d'agents: exemples commentés, outils informatiques et questions théorique.» 2008.
- Tsay, A.A, Nahmias S, et Agrawal N. *Modeling Supply Chain Contracts: A review in: Quantitative Models for Supply Chain Management.*, Boston, pp 299-336,1999. s.d.

- Tuncel, G., et G. Alpan. «Risk assessment and management for supply chain networks- A case study.» *Computers in Industry*, 2010: 250-259.
- Uschold, Mike, et Gruninger. Michael. «Ontologies: Principles, methods and applications.» *The knowledge engineering review*, 1996: 93-136.
- Veinot A.F. «The status of mathematical inventory theory.» *Management Science* 12 (1966): 745-777.
- Veinot, A.F. «Optimal policy in a dynamic, single product, non stationary inventory model with several demand classes, , 13 :.» *Operations Research* 13 (1965): 761-778.
- Virolainen, V M, M Tuominen, et J Hallikas. « Risk analysis and assessment in network environments: A dyadic case study.» *International Journal of Production Economics* 78, n° 1 (2002): 45-55.
- Viswanathan, S, H Widiarta , et R Piplani. «Value of information exchange and ynsynchronization in a multi- tier supply chain.» *International Journal of Production Research* 45, n° 21 (2007): 5057- 5074.
- Wagner, S.M., et C Bode. «Dominant risks and risk management practices in supply chains.» Dans *Supply Chain Risk: A Handbook of Assessment, Management and Performance*, de G.A. Zsidisin, & B Ritchie, 271–290. New York: Springer , 2009.
- Wagner, Stephan M, et Bode Christoph . «An Empirical Investigation into Supply Chain Vulnerability.» *Journal of Purchasing & Supply Management* 12 (2006): 301-312.
- Wagner, Stephan M, et N. Neshat. «Assessing the vulnerability of supply chains using graph theory.» *International Journal of Production Economics* 126, n° 1 (2010): 121-129.
- Wang, H., G.F. List, et F Di Cesare. «Modelling and Evaluation of Traffic Signal Control Using Timed Petri Nets.» *CESA*, 1993: 180-185 .
- Wang, Wenlin, Daniel E. Rivera, et Karl G. Kempf. «Model predictive control strategies for supply chain management in semiconductor manufacturing.» *International Journal of Production Economics* 107, n° 1 (May 2007): 56-77.
- Waters, D. (. *Supply chain risk management: vulnerability and resilience in logistics*. Kogan Page Publishers, 2011.
- Weber, C., J.R Current, et W.C. Benton. «Vendor selection criteria and methods.» *European Journal of Operational Research*, 1991.

- Wong, C. Y., et Arlbjorn J. S. «Managing uncertainty in a supply chain reengineering project towards agility.» *International Journal of Agile Systems and Management* 3 (2008): 282-305.
- Wu, D.D., et D.L. Olson. «Risk issues in operations: 'methods and tools'.» *Production planning and Control*, vol. 20 no. 4, pp. 293-294., 2010.
- Yee, S T. «Impact analysis of customized demand information sharing on supply chain performance.» *International Journal of Production Research* 41, n° 16 (2005): 3353–3373.
- Zsidisin, G. A., et B. Ritchie. « Supply chain risk management–developments, issues and challenge.» *In Supply Chain Risk* (Springer US), 2009: 1-12.
- Zsidisin, G. «Managerial perceptions of risk.» *Journal of Supply Chain Management* 14–25 (2003): 14–25.



## Résumé

En dépit de leur caractère distribué, les chaînes logistiques peuvent se révéler très performantes dans les conditions idéales de production et d'échange. Toutefois, leur complexité les rend de plus en plus fragiles. Cette thèse propose des modèles et des méthodes pour l'analyse des risques, de façon à renforcer la robustesse et la résilience des chaînes logistiques. Pour nous aider à mieux positionner nos travaux et à tirer les caractéristiques essentielles des chaînes logistiques, nous avons analysé ce domaine suivant une démarche ontologique à l'aide de la méthode KOD. En nous appuyant sur un état de l'art du domaine des risques dans les chaînes logistiques, et sur les bases de cas réels, nous avons identifié les indicateurs des vulnérabilités les plus significatifs. A partir des connaissances extraites, et des modèles mathématiques proposés dans la littérature, nous avons construit un modèle de chaîne logistique multi-étages à l'aide de modèles ARIMA intégrant l'aspect aléatoire de la demande. Pour adapter ce modèle aux situations de vulnérabilité et de risques, nous avons ajouté des contraintes de capacité et de positivité sur les commandes et sur les stocks. Sous l'effet d'événements dangereux, certaines contraintes du système peuvent être atteintes et par conséquent, son évolution peut s'écarter fortement de la dynamique nominale. Nous avons proposé des indicateurs de vulnérabilités comme des indicateurs de fréquence des retards de livraison, ou de surcoût d'immobilisation de produits. Enfin, l'occurrence d'événements dangereux a été représentée par des scénarios. Nous avons alors obtenu des résultats de simulation sous MATLAB, qui nous ont permis d'évaluer leurs conséquences pour différentes configurations du système, en particulier sous perturbation des flux d'informations (demande) et des flux physique (qualité de produits approvisionnés).

**Mots clés :** ARIMA, Chaînes logistiques, KOD, Modélisation, Ontologie, Risques, Vulnérabilités.

## Abstract

Despite their distributed nature, these supply chains can be very efficient in the ideal conditions of production and exchange. However, their complexity makes them more fragile. This dissertation proposes models and methods for risk analysis to enhance the robustness and resilience of supply chains. To help us to better position our work and grasp the essential characteristics of supply chains, we analyzed this area following an ontological approach using the KOD method. Based on state of the art in the field of risk in supply chains, and on real cases, we identified the indicators of the most significant vulnerabilities. From the extracted knowledge and mathematical models proposed in the literature, we built the model of a multi-stage supply chain using ARIMA models incorporating the randomness of the demand. In order to adapt this model to situations of vulnerability and risk, we have added capacity and positivity constraints on orders and inventories. First, we used this model in the unsaturated nominal regime, to characterize the behavior of the system under moderate random fluctuations. Under these types of inputs, the different stages of a supply chain also follow ARIMA models. Under the impact of hazardous events or strong disturbances, some constraints of the system can be reached and therefore, its evolution may deviate considerably from the nominal dynamics or even become unstable. We proposed vulnerability indicators such as indicators of the frequency of delivery delays or costs due to the immobilization of products. Finally, scenarios were used to represent the occurrence of dangerous events. We then got simulation results in MATLAB, which allowed us to assess their consequences for different configurations of the system, especially for strong disturbances of information flows (demand) and physical flows (quality of the products supplied).

**Keywords :** ARIMA, Supply chains, KOD, Modeling, Ontologies, Risks, Vulnerabilities.