



HAL
open science

Sur l'évaluation de performances des chaines logistiques

Laurent Cheyroux

► **To cite this version:**

Laurent Cheyroux. Sur l'évaluation de performances des chaines logistiques. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2003. Français. NNT: . tel-00197490

HAL Id: tel-00197490

<https://theses.hal.science/tel-00197490>

Submitted on 14 Dec 2007

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.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque

| / / / / / / / / / / / / / / / /

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité : Automatique – Productique

préparée au Laboratoire d'Automatique de Grenoble
dans le cadre de l'**Ecole doctorale d'Electronique, Electrotechnique,
Automatique, Télécommunications et Signal**

présentée et soutenue publiquement par

Laurent CHEYROUX

le 25 septembre 2003

Titre :

SUR L'EVALUATION DE PERFORMANCES DES CHAINES LOGISTIQUES

Directeur de thèse :

Maria DI MASCOLO

JURY

Yannick FREIN
Caroline THIERRY
Jean Pierre CAMPAGNE
Maria DI MASCOLO
Lionel DUPONT

Président
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse
Examineur

Remerciements

Je remercie les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait de juger cette thèse et pour leurs conseils en vue d'améliorer la qualité de ce travail.

Yannick Frein, Directeur du GILCO, INPG

Caroline Thierry, Maître de Conférence à l'Université de Toulouse Le Mirail

Jean Pierre Campagne, Directeur du département Génie Productique de l'INSA Lyon

Lionel Dupont, Directeur du Centre de Génie Industriel de l'Ecole des Mines d'Albi

Maria Di Mascolo, Chargée de Recherche au CNRS, LAG -INPG

Je remercie tout le personnel du laboratoire d'Automatique de Grenoble et en particulier les membres de l'axe « Evaluation de Performance » : Maria, Alexia Gouin, René David, Christian Commault, Stéphane Mocanu, Jean Marc Bollon et Rosa Abbou. Je remercie évidemment plus particulièrement Maria qui m'a encadré avec bienveillance durant ces trois années ainsi que Stéphane pour m'avoir dépanné PC et station tout au long de ma thèse.

Je remercie également les personnes des autres équipes de recherche avec qui j'ai pu avoir des contacts toujours agréables, les équipes techniques et administratives et plus encore Marie-Thé toujours là pour nous rendre service et nous faciliter la vie.

Je remercie Jean Marc, Rosa, Monica, Salvador et Clarisse qui ont partagé leur espace de travail avec moi pour une durée plus ou moins longue.

Je remercie enfin toutes les personnes que j'ai pu côtoyer durant mon séjour dans ces murs, qu'elles soient du LAG, du LEG, du LMN ou du LIS.

Sapiens nihil affirmat quod non probet...

Sommaire

<i>Introduction</i>	5
1.1 Contexte de l'étude	6
1.2 Objectifs et plan de la thèse	7
1.2.1 Objectifs de la thèse	7
1.2.2 Plan du rapport	8
1.3 Synthèse	9
<i>Caractéristiques des chaînes logistiques dans la littérature</i>	11
2.1 Remarques préliminaires sur les notions liées aux chaînes logistiques	12
2.1.1 Définition d'une chaîne logistique	12
2.1.2 Structure d'une chaîne logistique	13
2.1.3 Chaîne logistique ou réseau logistique ?	14
2.1.4 Origines de la thématique sur les chaînes logistiques	15
2.1.5 Notions nécessaires à la caractérisation des études	16
2.1.5.a Flux d'une entreprise	16
2.1.5.b Niveau de décision d'une chaîne logistique	17
2.2 Méthodologie de l'étude et motivations	18
2.3 Principaux thèmes	19
2.3.1 Coopération	20
2.3.2 Evaluation de performances	22
2.3.3 Planification	23
2.3.4 Modélisation	23
2.3.5 Effet Bullwhip	24
2.3.6 Autres thèmes	25
2.3.7 Conclusions	26
2.4 Analyse des caractéristiques des chaînes logistiques	27
2.4.1 Classification méthodologique des références	27
2.4.2 Structure des modèles	28
2.4.2.a Statistiques	28
2.4.2.b Analyse des résultats	29
2.4.3 Paramètres caractéristiques	31

2.4.3.a	<i>Statistiques</i>	31
2.4.3.b	<i>Analyse des résultats</i>	33
2.4.4	Indicateurs de performance	34
2.4.4.a	<i>Statistiques</i>	35
2.4.4.b	<i>Analyse des résultats</i>	37
2.4.5	Pilotage du réseau	39
2.4.5.a	<i>Statistiques</i>	39
2.4.5.b	<i>Analyse des résultats</i>	40
2.5	Conclusions sur la classification de la bibliographie	41
2.6	Etudes théoriques	44
2.6.1	Méthodes analytiques	44
2.6.1.a	<i>Thèmes traités</i>	44
2.6.1.b	<i>Structures</i>	45
2.6.2	Méthodes d'évaluation de performances	46
2.6.2.a	<i>Méthodes analytiques</i>	46
2.6.2.b	<i>Simulation</i>	49
2.7	Conclusions sur les caractéristiques des chaînes logistiques	50
2.8	Synthèse de l'étude bibliographique	51
 <i>Intérêt des méthodes analytiques pour l'étude des chaînes logistiques</i>		 53
3.1	Introduction	54
3.2	Construction du modèle d'étude	55
3.2.1	Présentation de la structure typique d'une chaîne logistique	55
3.2.2	Présentation de la méthode analytique utilisée	57
3.2.2.a	<i>Principe de la méthode</i>	57
3.2.2.b	<i>Hypothèses liées à l'utilisation de Palkan</i>	59
3.2.3	Modélisation par un réseau de files d'attente	60
3.2.3.a	<i>Modélisation des sites</i>	61
3.2.3.b	<i>Modélisation des transports</i>	62
3.2.3.c	<i>Gestion du réseau</i>	63
3.3	Analyse de l'influence des paramètres du réseau	64
3.3.1	Description de la procédure d'analyse	65
3.3.2	Mise en œuvre de l'analyse	66
3.3.2.a	<i>Analyse des effets de la variation du nombre de kanbans</i>	66
3.3.2.b	<i>Analyse des effets de la variation du temps de transport</i>	69
3.3.2.c	<i>Analyse des effets de la variation du volume des demandes</i>	72

3.3.2.d	<i>Analyse des effets d'une variation combinée des paramètres</i>	75
3.3.3	Conclusions	79
3.4	Synthèse sur l'étude analytique du modèle	81
 <i>Etude de l'impact d'une modélisation plus fine des transports</i>		 83
4.1	Motivation de l'étude	84
4.2	Analyse des pratiques industrielles de transport	84
4.2.1	Secteur routier	85
4.2.1.a	<i>Présentation du secteur</i>	85
4.2.1.b	<i>Organisation des transports</i>	85
4.2.2	Secteur maritime	87
4.2.2.a	<i>Présentation du secteur</i>	87
4.2.2.b	<i>Organisation des transports</i>	87
4.2.3	Secteur ferroviaire	88
4.2.4	Secteur fluvial	89
4.2.5	Secteur aérien	90
4.2.6	Bilan et compléments d'information	91
4.3	Modélisation des transports	93
4.3.1	Transport direct	93
4.3.2	Transport avec regroupement	95
4.3.3	Transport par une ligne régulière	96
4.3.4	Externalisation du stock	98
4.3.4.a	<i>Consolidation</i>	99
4.3.4.b	<i>Dégroupage</i>	99
4.4	Evaluation de l'intérêt d'une modélisation fine	100
4.4.1	Contexte de l'exemple	101
4.4.2	Analyse de la solution actuelle	102
4.4.2.a	<i>Le rail</i>	103
4.4.2.b	<i>La route</i>	104
4.4.2.c	<i>Le fleuve</i>	105
4.4.2.d	<i>Premier bilan</i>	106
4.4.3	Amélioration par délocalisation d'un site	107
4.4.3.a	<i>Le rail</i>	107
4.4.3.b	<i>La route</i>	108
4.4.3.c	<i>Le fleuve</i>	108
4.4.3.d	<i>Second bilan</i>	109

4.4.4	Comparaison avec la modélisation du modèle typique	110
4.4.4.a	<i>Cas de la route</i>	110
4.4.4.b	<i>Cas du rail</i>	111
4.4.4.c	<i>Bilan de l'étude</i>	112
4.4.5	Conclusions	113
4.5	Synthèse sur la modélisation des transports	113
 <i>Exploration d'autres modes de gestion du réseau</i>		<i>115</i>
5.1	Introduction	116
5.2	Gestion du réseau en kanban généralisé	116
5.2.1	Présentation du kanban généralisé	116
5.2.2	La notion de kanban généralisé dans le réseau logistique	117
5.2.3	Illustration de l'intérêt de la gestion par kanban généralisé	119
5.2.3.a	<i>Amélioration du taux de service</i>	119
5.2.3.b	<i>Amélioration de la transmission de l'information</i>	121
5.2.4	Utilisation pratique du kanban généralisé dans le réseau	123
5.2.4.a	<i>Utilisation en multiproduit</i>	124
5.2.4.b	<i>Implantation physique dans l'entreprise</i>	126
5.3	Gestion du réseau par un système « hub »	128
5.3.1	Préliminaire : Présentation du kanban étendu	128
5.3.2	Système « hub » et kanban étendu	129
5.3.3	Evaluation de la gestion par kanban étendu	131
5.3.3.a	<i>Comparaison entre le kanban et le kanban étendu</i>	131
5.3.3.b	<i>Discussion sur la modélisation</i>	132
5.3.4	Utilisation pratique du kanban étendu dans le réseau	133
5.4	Synthèse sur les politiques de gestion	134
 <i>Conclusions</i>		<i>137</i>
6.1	Le bilan	138
6.2	Les perspectives	140
 <i>Références bibliographiques</i>		<i>143</i>
 <i>Annexes</i>		<i>157</i>

Chapitre 1

Introduction

Dans ce chapitre introductif, nous allons présenter les conditions qui ont favorisé l'augmentation rapide des recherches concernant les chaînes logistiques. Nous considérerons les progrès techniques qui ont augmenté les possibilités offertes pour gérer des systèmes complexes ainsi que l'environnement économique actuel qui pousse à la compétitivité et à la recherche de l'efficacité.

Nous discuterons ensuite des objectifs majeurs de cette thèse, à savoir la clarification du domaine des chaînes logistiques à travers une étude de la littérature ainsi que l'analyse des possibilités offertes par les méthodes analytiques pour l'évaluation de performances de ces mêmes chaînes logistiques. Enfin, le plan du rapport sera présenté.

Quot capita, tot sensus...

1.1. Contexte de l'étude

L'étude de l'ensemble des acteurs coopérant pour produire une richesse, appelé « chaîne logistique », a connu un très fort développement au cours des vingt dernières années. Cela est principalement dû aux progrès techniques et au contexte économique.

En effet, d'un point de vue technique, la puissance de calcul des ordinateurs actuels permet de traiter de manière plus globale la logistique d'une entreprise, en incorporant plus de facteurs et en obtenant plus rapidement les résultats. Cela permet d'envisager un contrôle beaucoup plus large de la chaîne logistique, ce qui n'a pas toujours été le cas. De plus, de nouvelles techniques ont modifié le fonctionnement de l'entreprise en améliorant la communication, ainsi que la manière de produire. En effet, depuis longtemps les scientifiques réfléchissent sur la manière d'optimiser les processus internes de l'entreprise. Les résultats concluants de leurs recherches ont grandement réduit les marges de progression des entreprises dans ce domaine et c'est maintenant à travers une optimisation globale de leur chaîne logistique que les industriels sentent qu'ils peuvent faire la différence par rapport à la concurrence.

En effet, la concurrence est également un facteur de développement de ce thème car en plus de ce nouveau contexte technologique, un nouveau contexte économique qui mêle la mondialisation des échanges, la supériorité de la capacité de production par rapport à la demande ou encore le recentrage métier des entreprises s'est mis en place. Tous ces facteurs incitent les entreprises à optimiser leur chaîne logistique. En effet, un des effets de la mondialisation est d'augmenter la concurrence entre les entreprises qui doivent donc gagner sur tous les segments possibles. Le consommateur, placé en position de force par ce contexte, recherche aujourd'hui plus de qualité et de personnalisation du produit, et de qualité du service. Les entreprises doivent donc être plus performantes que jamais, toujours plus innovantes et plus réactives à un marché exigeant. Les capacités de production étant aujourd'hui supérieures à la demande, la politique des entreprises ne peut plus être la production aveugle. Dorénavant, le client est en tête de leurs considérations et c'est en fonction de lui que doivent être prises toutes les grandes décisions. Cette simple modification conceptuelle soulève énormément de problèmes car toute l'organisation de la chaîne logistique doit être modifiée. Certes, les entreprises ont toujours eu besoin de fournisseurs et de distributeurs, mais le nouveau point de vue adopté et le phénomène actuel de « recentrage

métier » augmente le poids de ce réseau. En effet, les entreprises ont traditionnellement une activité centrale, un métier, auquel viennent se greffer des activités complémentaires pour arriver à un produit fini. Alors que les entreprises avaient pour habitude d'effectuer une grande partie de ces tâches dites « annexes », il apparaît aujourd'hui plus rentable de soustraire ces activités. Mais le gain financier s'accompagne d'un agrandissement de la chaîne logistique et de problèmes accrus de communications. L'ensemble de ces facteurs, renforcé par des exemples industriels où les coûts logistiques représentent 30% du prix de vente final du produit [UME 98], placent aujourd'hui les problèmes liés à la gestion de la chaîne logistique comme le secteur prioritaire de tous les industriels.

Nous allons maintenant détailler les objectifs de ce travail de thèse ainsi que le plan du rapport.

1.2. Objectifs et plan de la thèse

1.2.1. Objectifs de la thèse

Un des premiers objectifs de ce travail était d'étudier une chaîne logistique « typique »¹. Pour cela il nous fallait isoler par une étude bibliographique une structure typique de chaîne logistique, les politiques de gestion associées, les paramètres significatifs et les indicateurs de performances associés. Mais nous avons pu constater que le secteur des chaînes logistiques est très vaste et souffre d'une certaine confusion. Il nous a donc semblé indispensable de classer la littérature en fonction des caractéristiques des chaînes étudiées.

Un des objectifs de cette thèse va donc être d'analyser la littérature actuelle pour définir les grands thèmes traités ainsi que les types de modèles utilisés. Une attention particulière sera portée aux structures étudiées ainsi qu'aux indicateurs de performances jugés importants. Cette partie de la thèse permettra d'éclaircir le cadre de travail dans le domaine des chaînes logistiques. Des travaux similaires ont été publiés pendant la durée de la thèse par Croom et al. [CRO 00] et Tan [TAN 01]. Cependant, ces études viennent en fait compléter la notre puisque ces personnes travaillent plutôt dans des secteurs du type commerce et économie. Un aspect intéressant est d'ailleurs que parmi les 167 références de notre étude, il n'y en a

¹ On entend ici par chaîne logistique typique, une structure reprenant toutes les caractéristiques classiques des chaînes logistiques tout en restant la plus simple possible.

quasiment aucune de commune avec celles citées par Croom et al. ou Tan, ce qui permet d'avoir une vision tout à fait différente.

Le second objectif de cette thèse sera d'étudier l'intérêt de l'utilisation de méthodes analytiques développées pour l'étude des systèmes de production, dans le domaine des chaînes logistiques. En effet, les prises de décision concernant la chaîne logistique mettent souvent en jeu des quantités d'argent très importantes et des études préliminaires doivent donc être entreprises de manière à évaluer les performances futures de la chaîne. Pour cela, les industriels peuvent recourir à la simulation mais les temps de calcul associés sont généralement très longs. Les méthodes analytiques elles, nécessitent une simplification du modèle mais proposent des solutions dans des délais très courts, souvent même de manière instantanée. En pratique, cela permet à l'industriel de multiplier les configurations testées tout en gagnant du temps. De petites études ont déjà été réalisées au LAG comme dans [ZIL 99b] ; l'objectif sera ici d'évaluer les possibilités d'utilisation de ces méthodes sur une structure typique de chaîne logistique.

1.2.2. Plan du rapport

Ce rapport s'articulera autour de quatre chapitres principaux, les deux autres étant l'introduction et la conclusion.

Dans le chapitre 2, nous allons tout d'abord étudier la littérature concernant les chaînes logistiques à travers les structures étudiées, les paramètres, les indicateurs de performances ainsi que les politiques de gestion, l'objectif final étant de faire une cartographie des thèmes traités. Pour cela nous allons utiliser une base de données de quelques 167 références recueillies tout au long de la thèse et réactualisée en permanence, le but de ce travail étant d'éclaircir le domaine. Une fois cette tâche terminée, nous utiliserons les données accumulées pour nous recentrer vers le domaine de l'évaluation de performances et des méthodes analytiques. Nous ferons une étude bibliographique des travaux effectués dans ce domaine.

Dans le chapitre 3, nous utiliserons encore les données accumulées pour construire un modèle typique de chaîne logistique prenant en compte les caractéristiques jugées importantes. Nous utiliserons ce modèle pour tester une méthode d'évaluation de performance utilisant les réseaux de files d'attente. Ces tests concerneront l'impact des différents paramètres de la chaîne et nous permettront de vérifier l'importance relative de chacun d'eux. Les deux chapitres suivants étudieront les besoins et les possibilités d'amélioration de la méthode.

Le chapitre 4 concernera la modélisation des transports. Une analyse des pratiques industrielles de transport sera effectuée. Les différentes situations identifiées seront ensuite modélisées et évaluées par simulation sur un exemple concret. Une comparaison avec la modélisation utilisée dans le réseau typique sera ensuite effectuée également par simulation, de manière à statuer sur le choix du degré de finesse de la modélisation.

Le chapitre 5 portera lui sur les politiques de gestion. Nous comparerons de manière analytique la politique kanban, utilisée dans le modèle de base, au kanban généralisé, en expliquant comment ce dernier mode de gestion peut être utilisé dans une chaîne logistique. Nous modéliserons ensuite un contrôle de type « hub ». Ce mode de gestion est en effet celui vers lequel les industriels devraient tendre dans le futur. Nous montrerons que le kanban étendu peut être appliqué dans cette configuration et nous comparerons ses performances aux autres modes de gestion du modèle par simulation. Enfin le chapitre 6 apportera les conclusions du rapport.

1.3. Synthèse

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté le contexte favorable au développement de la recherche sur les chaînes logistiques, que ce soit d'un point de vue technique ou économique. Techniquement, les principaux facteurs sont l'augmentation des puissances de calcul et l'optimisation déjà très poussée des processus internes de l'entreprise. Économiquement, la mondialisation, une concurrence accrue et le recentrage métier poussent les entreprises à l'optimisation de leur chaîne logistique.

Enfin nous avons rappelé les origines multidisciplinaires de ce thème qui sont sources d'une certaine opacité et qui ont donné la première motivation de cette étude qui est l'analyse de la littérature. Le deuxième but de cette thèse est la conception et l'analyse, à l'aide des méthodes analytiques, d'une chaîne logistique typique. Finalement, nous avons introduit le plan du rapport qui sera donc partagé entre l'analyse des 167 références littéraires et l'étude du modèle typique de chaîne logistique à l'aide des méthodes analytiques.

« Sur l'évaluation de performances des chaînes logistiques »

Chapitre 2

Caractéristiques des chaînes logistiques dans la littérature

Dans ce deuxième chapitre, nous commençons par préciser certaines notions nécessaires à notre étude comme par exemple une définition simple d'une chaîne logistique.

Nous procédons ensuite à une analyse de la littérature sur les chaînes logistiques. Comme nous l'avons vu en introduction, cette partie a comme objectifs de fournir un cadre d'étude de la littérature et d'accumuler des renseignements sur les caractéristiques des chaînes logistiques. Cette étude a donné lieu à une présentation dans une conférence internationale [CHE 02b] et à un article à paraître au Journal Européen des Systèmes Automatisés [CHE 03a]. Dans la suite de cette thèse, nous voulons évaluer l'intérêt des méthodes analytiques pour l'étude de ces chaînes logistiques. En relevant leurs caractéristiques nous pouvons savoir quels types de chaîne les méthodes analytiques doivent pouvoir traiter pour être efficaces dans la majorité des cas. De son côté, la création du cadre d'étude devrait permettre de clarifier la littérature et de faciliter son analyse

Pour mener à bien ces objectifs, nous avons progressivement constitué une base de données de 167 références dont les thèmes sont très variés. Nous détaillerons d'ailleurs les principaux pour illustrer cette grande richesse de la littérature et montrer le besoin de clarifier le domaine. Nous procédons à l'analyse de cette littérature en commençant par le type d'étude : empirique ou théorique, principalement pour nous positionner par rapport à l'étude publiée par Croom et al. [CRO 00], puis nous utilisons des critères comme la structure des chaînes, les paramètres et les indicateurs de performances utilisés pour à la fois construire le cadre d'étude de la littérature sur les chaînes logistiques et relever des informations sur les caractéristiques de ces chaînes.

Au moment de conclure sur l'efficacité de notre cadre d'étude, nous comparons nos observations avec celles de Croom et al.

Qui scribit, bis legit...

2.1. Remarques préliminaires sur les notions liées aux chaînes logistiques

Comme nous l'avons déjà signalé, le domaine des chaînes logistiques a été particulièrement traité ces dernières années. Cependant, ce développement n'a pas été le fait d'une seule et unique communauté scientifique car les chaînes logistiques se trouvent au carrefour de plusieurs disciplines. Cette position, qui est assurément une force, est également la source d'une certaine opacité du secteur. Nous allons ici essayer d'éclaircir quelques unes de ces notions et en particulier la définition d'une chaîne logistique, ainsi que l'ambiguïté entre les termes « chaîne » logistique et « réseau » logistique.

2.1.1. Définition d'une chaîne logistique

Dans leur article de synthèse de la littérature [CRO 00], Croom et al. donnent plusieurs définitions d'une chaîne logistique et de sa gestion. Ils y exposent le fait que ces définitions, sans être totalement contradictoires, ne donnent pas un même sens à ces termes. Nous avons effectué notre propre recherche dans ce domaine et les différentes définitions que nous avons pu trouver (par exemple [LEE 95], [TEI 97], [SWA 97] ou encore [GAN 99]) sont plutôt concordantes entre elles. Une explication de cette constatation vient sans doute du fait que nos deux études n'ont quasiment aucune référence en commun et n'utilisent donc pas les écrits de la même communauté scientifique (gestion de production pour la notre et économie et gestion pour la leur).

Pour la suite de notre travail, nous retiendrons donc la définition suivante d'une chaîne logistique : *« C'est un réseau de sites, indépendants ou pas, participant aux activités d'approvisionnement, de fabrication, de stockage et de distribution liées à la commercialisation d'un produit ou d'un service »*.

Cette définition concorde avec celles que nous avons pu trouver dans la littérature. De plus, à notre avis, elle présente l'avantage de laisser entrevoir les difficultés rencontrées par les industriels qui doivent gérer des sites pouvant être autonomes pour une activité collective, de montrer que la chaîne logistique englobe la totalité des activités liées à la production du produit et d'insister sur la structure en utilisant le terme « réseau ». Nous développerons d'ailleurs cette idée dans le paragraphe 1.2.3.

La gestion de cette chaîne logistique (que les anglophones nomment supply chain management et qui donne donc « le SCM ») regroupe donc l'ensemble des activités visant à conduire et améliorer cette chaîne logistique. Les définitions dans ce cas là sont donc plus variées car chacun adapte toujours un peu cette pensée à son domaine de compétence comme par exemple dans [ARC 99], [BAU 01], [HAE 02] ou encore [SRI 01]. Nous livrerons d'ailleurs la définition de cette dernière référence qui reste suffisamment vague sur les actions précisément concernées : « *Le SCM, c'est la coordination ou l'intégration des activités de toutes les entreprises impliquées dans les processus d'approvisionnement, de production, de livraison et d'entretien de produits ou de service pour des clients situés à différents endroits géographiques* ».

Enfin, rappelons que l'objectif de tous ces efforts est d'avoir la bonne quantité au bon endroit, au bon moment et ce au coût minimal. Ce but simple peut se décliner en une multitude de problèmes que nous étudierons dans le chapitre 2 à travers une large analyse bibliographique. Cette analyse devrait permettre de mieux cerner les différents enjeux rattachés à la notion de SCM ou gestion de la chaîne logistique.

Ces définitions indispensables étant données, nous allons maintenant nous intéresser à la structure d'une chaîne logistique.

2.1.2. Structure d'une chaîne logistique

Il est clair que toutes les chaînes logistiques ne se ressemblent pas. Lin et Shaw les classent dans [LIN 98] en trois types que l'on distingue par leur structure physique, le type d'opérations, leurs objectifs, les types de produits, les niveaux d'assemblage, le temps de vie du produit et le besoin de stock. Ces trois types sont des chaînes purement convergentes, caractéristiques de l'industrie automobile ou aéronautique, des chaînes avec assemblage à différenciation retardée, caractéristiques du secteur informatique, et enfin les chaînes ayant des changements d'environnement rapide, comme dans l'industrie textile. Beamon et Chen définissent eux quatre familles [BEA 01] qui seraient « convergents, divergents, conjoints et généraux ». Pour définir ces familles, on suit le trajet des matières dans la chaîne :

- Dans une chaîne convergente, la matière qui circule entre les sites converge vers un seul et même site qui est logiquement le lieu d'assemblage final. L'industrie navale ou encore aéronautique sont des bons exemples de ce type de chaîne.

- Dans une chaîne divergente, à l'opposé du cas précédent, la matière part d'un point unique et se distribue à travers la chaîne. Cela concerne par exemple l'industrie minière.
- Une chaîne que les auteurs nomment « conjointe » est la juxtaposition d'une chaîne convergente et d'une chaîne divergente. Ce cas de figure est illustré par la figure 1.

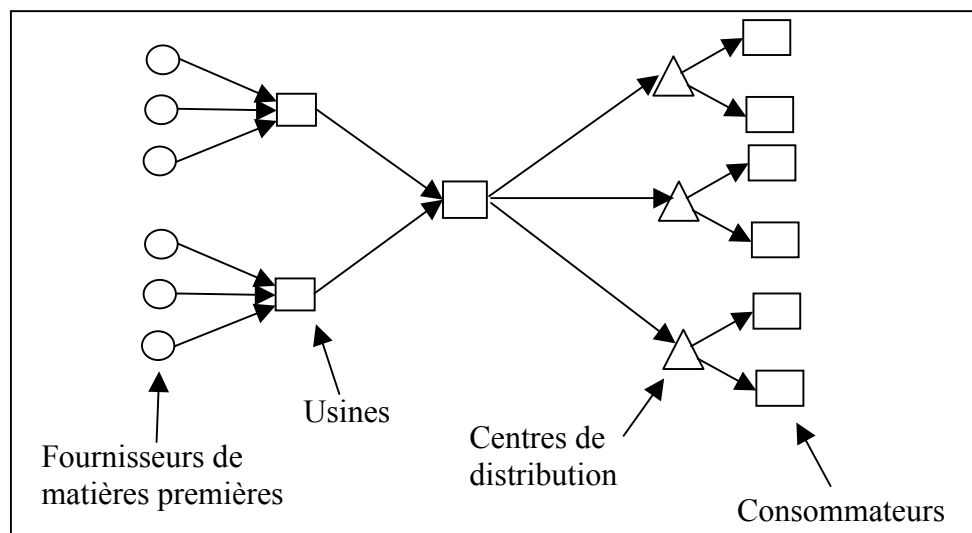


Figure 1 : Structure d'une chaîne logistique conjointe

- Enfin les chaînes mixtes ne sont ni totalement convergentes ni totalement divergentes. Elles concernent par exemple l'industrie automobile dont, comme nous l'avons dit, la partie amont est plutôt convergente alors que la partie aval est divergente.

Sur la figure 1, on considère les trois niveaux essentiels de la chaîne : les fournisseurs, les producteurs et les vendeurs. Toutes les chaînes peuvent également être classées selon leur politique de gestion comme nous le verrons au chapitre suivant. En attendant, nous avons maintenant assez d'éléments pour répondre à la question suivante : les structures que nous étudions sont-elles des chaînes logistiques ou des réseaux logistiques ?

2.1.3. Chaîne logistique ou réseau logistique ?

La plupart (pour ne pas dire tous) des articles du domaine parlent de la chaîne logistique. Cela vient de la traduction de l'anglais « supply chain ». Cette expression se traduit habituellement par « chaîne logistique » ou littéralement par « chaîne d'approvisionnement », ce qui est une notion extrêmement réductrice par rapport à la taille du domaine. L'expression

française a supprimé la notion d'approvisionnement mais a conservé celle de chaîne. Cependant, si nous nous rappelons les définitions mathématiques, la structure que nous observons n'est pas une chaîne au sens propre. Sans être aussi pointilleux, le terme chaîne est lié à une notion réductrice de linéarité ce qui n'est pas le cas des structures logistiques que nous venons de présenter qui sont des réseaux. L'expression correcte serait donc « réseau logistique » pour être rigoureux. Cependant cette expression est nettement moins utilisée et conduit maintenant parfois à une méprise avec le réseau de distribution. De manière à être compris de tous, nous nous autoriserons donc à utiliser le terme chaîne logistique même si nous gardons bien en tête que nous sommes en présence d'un réseau. Ce point de détail étant passé, nous allons nous intéresser un instant à la cause majeure de l'opacité du domaine des chaînes logistiques, c'est-à-dire ses origines.

2.1.4. Origines de la thématique sur les chaînes logistiques

Tan s'est intéressé aux origines des chaînes logistiques dans sa synthèse bibliographique [TAN 01]. Pour lui, le domaine de la gestion des chaînes logistiques est le produit de la fusion de deux grandes activités industrielles qui sont « les achats et approvisionnements » d'une part et « les transports et la logistique » d'autre part. Cela expliquerait donc la multitude de sujets concernant les chaînes logistiques. Croom et al. [CRO 00] nous expliquent eux que la littérature sur le sujet provient de plusieurs communautés scientifiques différentes comme l'économie, les sciences sociales ou encore la productique, ce qui explique non seulement la diversité des sujets traités mais également le manque d'uniformité du domaine. Ils citent plusieurs secteurs de la littérature qui ont dérivé vers ce domaine comme l'approvisionnement, les transports, le marketing, l'organisation industrielle, les systèmes de production, le management stratégique ou encore le développement économique. En effet, comme nous l'avons vu, la gestion de la chaîne logistique est un processus global qui nécessite la participation de tous les secteurs de l'entreprise. Un grand nombre de volets de la recherche sont donc concernés. Toutes ces communautés ont pris conscience indépendamment les unes des autres de l'importance des chaînes logistiques et ont donc commencé à développer des outils en utilisant les connaissances acquises au cours de leurs recherches antérieures. C'est pourquoi on trouve tant d'approches différentes pour traiter les problèmes de gestion de la chaîne logistique. C'est aussi pourquoi ce domaine s'est développé très vite.

Avant de rentrer dans le vif du sujet et de faire une analyse de la littérature avec une orientation plus « productique » que Tan [TAN 01] et Croom et al. [CRO 00], nous allons préciser deux dernières notions nécessaires à la suite de l'étude.

2.1.5. Notions nécessaires à la caractérisation des études

Dans la suite de cette thèse nous allons nous attacher à identifier les thèmes forts de la littérature sur la gestion des chaînes logistiques. Pour nous permettre de classer les références, l'identification des flux étudiés ou encore du niveau de décision concerné peut être intéressante, c'est pourquoi nous allons maintenant expliquer ces deux notions.

2.1.5.a. Flux d'une entreprise

Le bon fonctionnement d'une entreprise repose sur la circulation efficace de certains flux. On peut les classer en trois catégories : les flux de matières, les flux d'information et les flux monétaires, comme le montre la figure 2.

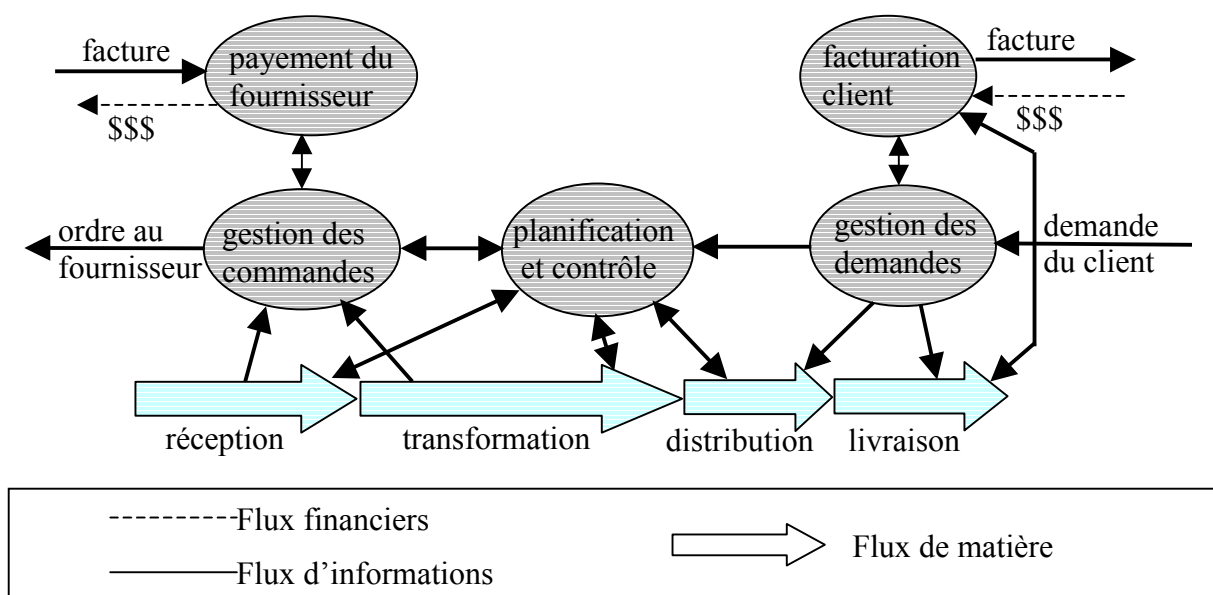


Figure 2 : Flux d'une entreprise (Source [MET 98])

Tous ces flux ne sont évidemment pas indépendants mais les études sur lesquelles nous nous sommes appuyés insistent plus ou moins sur chacun d'entre eux suivant leurs orientations. Sur la figure, on peut observer les interactions entre les flux au niveau d'une seule usine. On peut donc imaginer la complexité des problèmes liés à la gestion d'un réseau

d'usines qu'il faut coordonner. C'est pourquoi, même si nous avons vu qu'une chaîne logistique est une structure développée, nous trouverons par la suite de nombreuses études n'étudiant qu'un réseau très réduit. De plus d'un point de vue pratique, une bonne gestion de la chaîne logistique implique de gérer efficacement tous ces flux entre les sites. Or, lorsque ces sites sont indépendants les uns des autres, leur pleine coopération peut s'avérer en réalité au moins difficile sinon impossible.

Nous allons maintenant voir une autre notion qui pourra nous être utile par la suite : les niveaux de décision d'une chaîne logistique.

2.1.5.b. Niveaux de décision d'une chaîne logistique

Comme pour les décisions d'une seule entreprise, on peut classer les décisions concernant le réseau en entier en trois catégories qui correspondent en fait à trois horizons temporels.

- Le niveau stratégique : Les décisions stratégiques concernent le long terme et le réseau dans sa globalité. Par exemple la recherche de la localisation des sites, une nouvelle gamme de produit, la décision de lancement sur un nouveau marché, un changement global de la gestion de la chaîne, etc.
- Le niveau tactique : A ce niveau les grandes décisions stratégiques ont déjà été prises. Les décisions concernent des réajustements locaux et on se concentre sur un secteur particulier de la chaîne comme par exemple l'analyse des relations avec un fournisseur, l'amélioration des transports entre sites... Ce sont des décisions à moyen terme.
- Le niveau opérationnel : Il concerne le court terme et donc le fonctionnement quotidien de la chaîne (par exemple l'analyse des niveaux de stock, de la qualité du service...). Cependant, les niveaux tactique et opérationnel ne sont souvent pas différenciés.

Cette notion peut être intéressante pour situer un article, cependant il n'est pas rare qu'une étude traite de problèmes à plusieurs niveaux en même temps (stratégique et tactique par exemple).

2.2. Méthodologie de l'étude et motivations

Les motivations de cette étude de la littérature sur les chaînes logistiques sont diverses. Tout d'abord nous voulons étudier les possibilités des méthodes analytiques pour l'étude des chaînes logistiques. En effet, évaluer les performances d'un système complexe peut prendre du temps mais les méthodes analytiques permettent généralement d'obtenir de bons résultats approchés dans des délais extrêmement courts. Des cas simples ont déjà été traités dans [ZIL 99b] en utilisant une méthode développée pour l'étude des systèmes de production. Nous allons donc étudier les caractéristiques des réseaux logistiques comme la structure, la politique de gestion ou encore les indicateurs de performance de manière à savoir quels types de réseaux les méthodes analytiques doivent pouvoir traiter pour être efficaces dans un maximum de cas réalistes.

D'un autre côté, nous avons pu constater au cours de notre étude que le développement rapide du domaine par différentes communautés scientifiques a donné naissance à une certaine confusion et que le thème « chaîne logistique » est bien trop vaste pour définir clairement les études pratiquées. Nous espérons donc mettre de l'ordre en donnant un cadre permettant de classer les études. Cela permettra d'avoir une image plus nette d'un domaine qui reste encore flou et que certains considèrent encore comme un « mélange » de disciplines. Cela nous permettra aussi d'obtenir une idée de l'état actuel de la recherche dans ce domaine et de voir par exemple quels sont les grands thèmes traités ou encore ceux qui émergent.

La méthodologie que nous avons utilisée pour cette analyse est extrêmement simple. Nous avons recherché les articles traitant des chaînes logistiques (que ce soit dans le titre, au niveau du résumé ou des mots clés) dans des revues comme « Operations Research », « International Journal of Production Research » ou encore « IIE Transactions ». Nous avons complété cette base de données en recherchant des articles librement disponibles sur Internet. Nous avons également accumulé des références de manière plus libre, par contact avec d'autres scientifiques ou au travers de conférences. Il est à noter que nous avons eu accès très tardivement à la revue « European Journal of Purchasing and Supply Management » qui n'est pas couramment consultée dans notre domaine mais qui a publié les deux intéressantes études de Croom et al. [CRO 00] et Tan [TAN 01]. Ces études sont formellement très proches de notre travail mais la littérature consultée est très différente de la notre puisque axée essentiellement sur des revues de type « business management ». De plus, si l'on compare le panel utilisé par Croom et al., dont l'étude est la plus proche de la notre, on constate qu'il est

plutôt composé d'études empiriques alors que le notre est majoritairement composé d'études théoriques, comme nous allons le voir dès la partie suivante.

Au fur et à mesure de la constitution de notre base de données, nous avons étudié les articles suivant des critères comme la structure étudiée, les principaux indicateurs de performances utilisés ou encore les paramètres semblant avoir la plus grande influence sur le comportement de la chaîne. Là encore, les motivations étaient multiples. Ce type d'indication peut tout d'abord aider à quadriller l'espace de la recherche. Par exemple une étude dont l'objectif est l'analyse d'un réseau de recyclage sera facilement identifiable par la structure étudiée. De même les études sur l'impact environnemental seront caractérisées par des indicateurs de performances particuliers. Ces cas sont un peu extrêmes mais nous allons montrer que tous les articles peuvent être répertoriés à l'aide de nos critères. Une autre motivation est encore une fois la caractérisation des chaînes logistiques. Quels types de structures apparaissent dans la littérature ? Quels sont les indicateurs de performances les plus importants ? Répondre à ces questions nous permet de définir ce que les méthodes analytiques doivent pouvoir traiter pour être performantes dans le domaine.

Avant de commencer l'étude et de passer en revue les différents critères de classification que nous avons choisis, nous allons illustrer la grande diversité de la littérature sur les chaînes logistiques en répertoriant les principaux thèmes abordés.

2.3. Principaux thèmes

Les thèmes liés aux chaînes logistiques sont très nombreux. Nous avons répertorié tous ceux traités dans les articles à notre disposition. Nous avons ensuite fait des regroupements de manière à avoir un nombre restreint de catégories. Un grand nombre de références ont alors été éliminées car elles se démarquaient trop du reste des études. Un tableau un peu plus détaillé que celui de la page suivante est fourni en annexe A. Le résultat simplifié prend tout de même en compte une partie importante de la littérature qu'il classe dans 13 catégories. Ce résultat est présenté sous forme de tableau (tableau 1) à la page suivante. Les cinq catégories les plus importantes sont présentées plus en détail sous ce tableau.

Thèmes abordés	Références concernées
Coopération : <ul style="list-style-type: none"> • Fournisseur/ Revendeur • N fournisseurs/ Usine • Usine/ N revendeurs • Chaîne 	36 [AGR 00] [AVI 01] [AXS 01] [BAI 00] [BAI 01] [CAC 01b] [COR 01a] [COR 01b] [DEL 01] [ERT 02] [GAV 99] [GAV 02] [GJE 02] [HOM 00] [KIM 00] [MOS 00] [PAS 00] [RAG 01] [SWA 97] [TAY 01] [TAY 02] [TEL 01] [TEL 03] [WEN 99] [ZHA 02b] [CHE 01c] [SCH 98] [CAC 00] [CAC 01c] [CHE 01a] [CHE 01b] [KLA 02] [RAG 03] [VIS 01] [GAU 00] [MUN 01]
Evaluation de performance et optimisation : <ul style="list-style-type: none"> • Cas industriels • Cas d'école 	21 [ARN 95] [CAM 97] [LEE 93a] [LEE 93b] [LEE 95] [NIS 00b] [POO 94] [RAO 98] [ZIL 99a] [ARC 99] [BAU 01] [COH 88] [DIM 95] [ETT 00] [JAN 01] [JEL 01] [KON 01] [SRI 01] [UME 98] [VID 01] [VIS 99]
Planification	15 [BER 02] [CHU 01] [FEI 99] [FRE 01] [GAR 02] [GRA 96] [GRA 98] [KHO 02] [KIM 02a] [MAR 93] [MUK 03] [PAR 99] [ROB 02] [THO 02c] [TIM 00]
Modélisation	12 [FLE 01] [FOX 00] [JAI 99] [LEE 01] [MON 03] [PAR 98] [PON 02] [SIM 01] [SWA 98] [TEI 97] [THI 01]
Effet Bullwhip	7 [BAG 98] [CAR 00] [CHE 99] [DEJ 03] [LEE 97a] [LEE 97b] [WU 98]
Analyse de paramètres	5 [BEA 01] [CAC 01a] [DAV 02] [RID 02] [ZIL 99b]
Transports	5 [BER 99] [CHE 02a] [GRA 01] [ROY 89] [VRO 00]
Internet	4 [ALD 03] [CHI 03] [LEE 02] [ZEN 99]
Technologies de l'information	3 [CLA 01] [KEK 99] [THE 01]
Compétition	3 [COR 01c] [LI 02] [MAH 01]
Environnement	3 [JON 02] [WYC 99] [YTT 99]
Sous-traitance	3 [HEL 99] [LAK 01] [NOV 01]
Méthodes de prévision	3 [KIM 03] [ZHA 01] [ZHA 02a]

Tableau 1 : Principaux thèmes traités (120 références)

2.3.1. Coopération

La plus grosse catégorie avec 34 références est donc la catégorie « coopération ». Il faut dire que sous ce terme nous avons regroupé plusieurs notions comme le partage des prévisions de vente comme étudié dans [AVI 01], l'accord sur une gestion des stocks comme dans [AXS 01] et [AXS 03] ou encore les rapports de domination dans la chaîne comme dans [ERT 02]. Cette catégorie regroupe donc toutes les références où les acteurs essayent de se mettre d'accord pour améliorer les performances du réseau et non plus leurs performances

locales. En effet, des études comme [GJE 02], [MUN 01] et [WEN 99] montrent sur des exemples théoriques qu'une réflexion globale est plus efficace qu'une optimisation site par site. Si on garde une vision locale, [KIM 00] démontre mathématiquement qu'une amélioration des performances à un niveau est souvent compensée par une dégradation à un autre endroit. Cependant les améliorations permettant la coopération se font au prix d'investissements sur des équipements parfois coûteux. On étudie donc dans [SWA 97] le rapport investissement/bénéfices pour montrer le véritable bénéfice pour l'entreprise. De plus, on montre dans [GAV 99] que sous certaines conditions (variance trop élevée...) les améliorations ne sont pas forcément très nettes.

Cette problématique globale de la coopération peut se décliner suivant de nombreux facteurs. Par exemple de nombreuses études traitent le cas de deux sites (une usine et son fournisseur) mais nous pouvons également trouver d'autres configurations comme une usine et plusieurs revendeurs dans [CAC 00], [CAC 01b], [CHE 01a], [CHE 01b], [KLA 02] et [RAG 03]. La coopération peut s'effectuer sur plusieurs aspects problématiques des relations comme les commandes qui sont traditionnellement surdimensionnées. Par exemple dans [CAC 01c], le client n'a pas confiance dans la capacité de son fournisseur et passe donc une commande plus élevée que son besoin réel pour être sûr qu'il sera satisfait. Le fournisseur connaissant ces pratiques produit volontairement une quantité inférieure à la commande pour ne pas avoir de surplus et au final toutes les quantités sont fausses. On étudie donc un cadre de partage des informations pour mettre fin à cette situation. Dans le même ordre d'idée, lorsqu'un revendeur travaille avec des produits périssables, il commande toujours une quantité inférieure à ce qu'il pense pouvoir vendre, de manière à ne pas avoir d'inventures. On étudie donc dans [AGR 00] un système de partage des risques de manière à pouvoir écouler plus de marchandises et finalement augmenter le bénéfice. D'autres types de contrats concernent par exemple les frais de stockage. Dans [MOS 00], on trouve que pour améliorer les performances globales, un des deux sites doit augmenter son stock de sécurité. Comme il augmente ainsi ses coûts de stockage, on étudie un système de partage des frais entre les deux sites pour que l'amélioration se répartisse équitablement entre les deux acteurs.

On comprend mieux l'étendue de ce thème de la coopération à partir du moment où tout type d'accord est envisageable. Ainsi, dans [GAU 00] on étudie les possibilités de coordination horizontale entre les producteurs dans le secteur fruitier. Dans [COR 01b], une usine tente de réduire son utilisation de produits consommables en impliquant la société qui les lui vend. Dans [ZHA 02b], deux sites cherchent un accord sur le prix de vente qui sera pratiqué au client et dans [TAY 02] deux autres sites étudient un contrat de prime à la vente

donné par le fabricant au revendeur. Enfin dans [VIS 01], le fabricant incite financièrement ses clients à passer leurs commandes le même jour, de manière à simplifier sa planification.

Ce ne sont que quelques exemples parmi d'autres, les possibilités de ce thème sont aussi riches que les possibilités d'accords dans la réalité.

2.3.2. Evaluation de performances

La deuxième catégorie que nous avons formée avec 21 références repose sur les méthodes d'évaluation de performance et parfois d'optimisation. Cette partie nous intéresse doublement car dans la suite de l'étude nous nous intéressons aux méthodes analytiques d'évaluation de performance. Nous y reviendrons donc plus en détail dans la partie 2.4.2.

Les méthodes d'évaluation de performance peuvent être basées sur la simulation ou utiliser des méthodes analytiques. Ces méthodes sont parfois développées pour répondre à un besoin industriel. Dans ce cas là, les études qui en découlent ont souvent pour but d'optimiser le réseau. Les demandes industrielles les plus fréquentes consistent à trouver le réseau logistique qui minimise les coûts [CAM 97], à trouver le réseau le plus rapide et établir un rapport vitesse/coût [ARN 95], à trouver celui qui obtient le meilleur taux de service [RAO 98], d'étudier les performances du réseau actuel par rapport au réseau optimal [POO 94] ou bien de changer son mode d'approvisionnement pour voir les effets en termes d'argent et de temps [LEE 93b]. On peut également mettre en exergue et classer les impacts des droits de douanes, du transport, de la main d'œuvre, des impôts et des charges fixes dans le coût total d'un produit, regarder l'impact global si on effectue une modification souhaitée à un niveau local (modification de l'ordre des commandes) ou encore faire des expériences sur l'organisation au sein de la chaîne comme dans [ZIL 99a] où on optimise les lieux de stockage. D'autres méthodes d'évaluation de performances et d'optimisation sont développées de manière académique, sans support industriel, et sont ensuite illustrées par des exemples classiques comme la minimisation des coûts de stockage sous contrainte d'un taux de service minimal. Dans [COH 88] et [ETT 00] par exemple, on joue sur l'équilibre entre le niveau de stocks et le taux de service pour obtenir un bon taux de service avec des stocks peu élevés, alors que dans [SRI 01] on montre à nouveau l'intérêt d'une optimisation globale plutôt que locale.

Enfin, certaines études peuvent se démarquer des autres par le type de réseau qu'elles évaluent comme Vidal et Goetschalckx qui dans [VID 01] étudient un réseau international et

axent donc leur étude sur le problème des taxes aux frontières ou encore [KON 01] dans lequel on étudie un réseau logistique inverse².

2.3.3. Planification

Dans notre tableau, la planification étendue de la production occupe la troisième position avec 15 références. Ce domaine clé est en pleine extension à l'heure actuelle. Les problèmes à traiter sont extrêmement complexes puisqu'on ne considère plus un site individuellement mais « l'entreprise étendue ». La planification peut être rattachée à beaucoup d'autres thèmes puisque les décisions vont des possibilités de sous-traitance jusqu'au système d'information à mettre en place comme étudié dans [KHO 02]. Là encore, on trouve des études industrielles comme [BER 02], [MAR 93] ou encore [MUK 03] et des études académiques comme [GRA 98], [PAR 99] ou encore [THO 02c]. Dans ce nouveau contexte, il semble que le traditionnel MRP ne suffise plus comme le montre [FRE 01] mais plusieurs études s'articulent autour de lui pour développer des méthodes qui l'améliorent comme dans [GRA 98]. En effet, dans ce thème, l'heure est encore à la formalisation des problèmes comme dans [THO 02c] où l'on essaye de se ramener à un cas de type « job shop », moyennant quelques modifications. Beaucoup de techniques différentes sont proposées comme la simulation dans [GAR 02], la programmation linéaire dans [MAR 93] et [TIM 00], les approches type « Monte Carlo » dans [KHO 02] ou encore les algorithmes génétiques dans [BER 02].

D'autres méthodes sont sûrement en développement, ce secteur étant particulièrement actif à l'heure actuelle.

2.3.4. Modélisation

Nous avons différencié les études de modélisation des études d'évaluation de performance même si ces dernières commencent évidemment par modéliser le problème. Dans ce groupe qui compte 12 références, nous retrouvons les études dont les questions de modélisation représentaient le cœur du sujet. Les discussions peuvent être axées en deux sens : l'outil avec lequel on va modéliser le système ou alors la manière dont doit être modélisé un réseau particulier.

². Réseau de démontage et de recyclage des produits.

La partie méthode est largement dominée par les études sur les agents intelligents³ comme dans [FOX 00], [PAR 98], [SWA 98] ou encore [TEI 97]. Dans ces études, on associe un type d'agent à chaque fonction de l'entreprise. Les agents intelligents peuvent être utilisés pour évaluer les performances du réseau mais également pour aider à sa gestion. Ces articles se concentrent, pour le moment, plus sur les aspects techniques que sur les applications.

Dans la partie sur les réseaux particuliers, on trouve des articles sur le domaine des semi-conducteurs comme dans [LEE 01a] où l'auteur explique comment construire un modèle car il considère que les réseaux du domaine des semi-conducteurs se démarquent par leur fonctionnement interne (flux réentrant) et leur gestion et demandent donc une approche particulière. Dans le même secteur et pour les mêmes raisons, Jain et al montrent qu'un modèle de réseau logistique dédié aux semi-conducteurs doit être beaucoup plus détaillé qu'un modèle classique sous peine d'obtenir une précision des indicateurs de performances peu convaincante [JAI 99]. Récemment, on a assisté à l'émergence des réseaux inverses comme dans [FLE 01] qui explique la structure de ces réseaux à part. Ces réseaux sont totalement différents de ceux de fabrication classiques puisqu'ils mettent en œuvre des fonctions comme l'acquisition, le test et le réusinage. Enfin, la modélisation peut se focaliser sur un point clé comme les sites de reconditionnement dans la partie distribution du réseau [SIM 01].

La suite de notre étude concernera d'ailleurs également la modélisation puisque nous construirons un modèle typique de chaîne logistique et que nous étudierons des points clés comme la modélisation des transports.

2.3.5. Effet Bullwhip

La dernière catégorie que nous allons détailler est dédiée à l'effet Bullwhip⁴. On trouve 7 références sur ce phénomène mis en évidence dans différentes entreprises, comme Procter & Gamble par exemple. En effet, il a été observé que même avec une demande fiable et constante, les ventes peuvent fluctuer et les ordres de fabrication peuvent avoir une variance de plus en plus élevée lorsqu'on remonte dans le réseau. Ce phénomène a, bien entendu, des conséquences néfastes pour l'efficacité du réseau logistique comme des stocks élevés pour parer aux variations, un service client défectueux puisqu'il arrive plus fréquemment de tomber à court de produits, des revenus en moins pour des commandes non honorées, une

³. Un agent intelligent est une partie de programme indépendante possédant la connaissance de son environnement, la capacité à réagir à un changement dans cet environnement et la possibilité de communiquer avec les autres agents.

désorganisation du planning de transport entre les sites puisque la variance devient très élevée ou encore une mauvaise orientation de la gamme de production pour répondre à des pics imaginaires. La plupart des articles, comme [LEE 97a] ou [CHE 99], considèrent que les causes de l'effet Bullwhip sont la succession des mises à jour des prévisions de ventes, les commandes par lots, le manque de capacité, les ruptures, les temps de transfert et les variations de prix

Pour lutter contre cet effet, la plupart des articles travaillent sur les méthodes de prévisions de la demande, comme par exemple [CAR 00] ou [LEE 97b]. Chen et al. [CHE 99] étudient également le partage des informations entre les sites alors que Dejonckheere et al. [DEJ 03] considèrent que le problème ne vient pas de la méthode de prévision mais qu'il faut complètement changer le contrôle des stocks. Enfin, Baganha et Cohen [BAG 98] étudient le rôle du grossiste dans la stabilisation des demandes qui remontent vers l'usine. Ils montrent que sous certaines conditions le grossiste peut annuler l'effet "Bullwhip".

Ce thème est assez largement représenté même s'il traite d'un point très précis. Nous allons maintenant jeter un rapide coup d'œil aux autres thèmes que nous avons répertoriés.

2.3.6. Autres thèmes

Parmi les nombreux autres thèmes représentés dans la littérature, on peut citer les études de paramètres comme [BEA 01] que nous isolons du reste de l'évaluation de performance puisque nous allons nous y intéresser dans le chapitre 3. Dans cette étude, les auteurs effectuent des simulations visant à montrer quels paramètres influencent le plus leurs indicateurs de performance. Les études de paramètres peuvent être empiriques comme, par exemple, dans [DAV 02] ou analytiques comme dans [ZIL 99b]. On cherche souvent dans ces études à montrer les paramètres les plus importants et à quantifier leur effet sur le système. Cela permet ainsi de comprendre le fonctionnement du réseau et les interactions entre ses différentes composantes.

D'autres études portent sur les transports comme [CHE 02a] ou [GRA 01]. Le problème est généralement de minimiser les coûts tout en livrant un certain nombre de clients [BER 99]. Dans [ROY 99], les auteurs étudient la manière d'optimiser leur réseau de distribution en modifiant l'emplacement et les caractéristiques des sites ou encore le nombre de camions utilisés alors que dans [VRO 00] on réfléchit aux quantités à emporter sachant que les coûts

⁴. En français, l'effet coup de fouet ou effet de vague. Cette image des ondulations du fouet représente l'augmentation de la variance de la demande en remontant dans la chaîne logistique.

ne sont pas linéaires. Dans [JON 02], on considère toujours le problème des transports mais sous l'angle environnemental cette fois. D'autres études concernent l'environnement comme [WYC 99] ou [YTT 99] dans lequel les auteurs analysent le rôle prépondérant de l'entreprise dominante du réseau. Si cette entreprise, sous la pression commerciale de ses clients, place l'environnement dans ses priorités, cela aura un impact sur ses partenaires beaucoup plus fort qu'une législation. La question des partenaires et en particulier des sous-traitants est étudiée dans [LAK 01], [NOV 01] et [HEL 99]. Les conclusions sont les mêmes dans les trois cas : mieux vaut faire soi-même un produit complexe et externaliser un produit simple. Le réseau logistique s'accroissant avec tous ces partenaires, les systèmes d'informations deviennent cruciaux. Ainsi, on étudie dans [KEK 99] les effets de l'E.D.I.⁵, alors que dans [CLA 01], on classe aussi tous les autres niveaux d'informatisation des données. Les réseaux informatiques, et en particulier Internet, ouvrent la voie à de nouvelles pratiques commerciales comme l'étudie Aldin dans [ALD 03]. De leur côté, Chiang et al. [CHI 03] et Lee et Whang [LEE 02] étudient les effets de l'ouverture d'un réseau de vente directe par Internet. Enfin des articles comme [LI 02], [COR 01c] ou bien encore [MAH 01] sont consacrés à la concurrence omniprésente dans le secteur des chaînes logistiques.

De nombreux autres thèmes sont traités dans la littérature, le but ici étant moins de les répertorier tous que de faire montre de cette grande diversité.

2.3.7. Conclusions

Dans cette partie, nous avons présenté les études en fonction du sujet qu'elles traitaient de manière à montrer la grande diversité de ce domaine. Le but n'était pas ici de faire un compte rendu exhaustif des thèmes traités. En effet, il est très difficile d'établir des clivages par grandes familles car les articles peuvent souvent se rattacher à plusieurs à la fois. De plus, de très nombreux thèmes statistiquement moins représentés que les autres dans notre base de données n'ont pas été présentés par souci de légèreté. Nous avons donc effectué un choix mais d'autres types de classements sont possibles, comme celui de Lourenço dans [LOU 03].

Nous allons maintenant commencer la véritable étude concernant la classification de cette bibliographie et la collecte de données sur les caractéristiques des réseaux logistiques.

⁵. E.D.I. : Electronic Data Interchange, soit donc en français la transmission automatique des données entre les entreprises par des réseaux informatiques.

2.4. Analyse des caractéristiques des réseaux logistiques

Dans cette partie, nous allons donc étudier les caractéristiques des réseaux logistiques à travers les 167 références que nous avons collectées. Chaque partie sera organisée de la même manière avec tout d’abord les statistiques, les résultats bruts, puis les réflexions que ces données nous ont inspirées. Mais nous allons tout d’abord regarder le type de méthodologies utilisées.

2.4.1. Classification méthodologique des références

Pour cette classification, nous avons quasiment utilisé les mêmes catégories que Croom et al. dans [CRO 00]. Nous pouvons ainsi situer notre étude par rapport à la leur, ce qui nous permettra d’expliquer d’éventuelles observations différentes par la suite. Ils ont classé leurs références suivant quatre critères qui sont : étude empirique ou théorique et normative ou descriptive. Leur base de données est constituée de 83% d’études empiriques dont les deux tiers sont descriptives et 17% d’études théoriques dont, là encore, les deux tiers sont descriptives.

Nous décrivons notre base littéraire d’une manière similaire, en reprenant les notions de théorique et empirique et normatif et descriptif. Nous obtenons la classification du tableau 2.

	Etudes normatives (21%)	Etudes descriptives (79%)
Etudes empiriques (14%)	2% (3)	10% (16)
Etudes théoriques (86%)	16% (26)	57% (96)
Applications industrielles	2% (4)	
Analyses bibliographiques	13% (22)	

Tableau 2 : Classification méthodologique de la littérature

Dans notre esprit, les études empiriques sont basées sur des constatations et l’observation de la réalité (par sondages, questionnaires) contrairement aux études théoriques qui s’appuient sur un modèle. De même, les études descriptives expliquent un phénomène constaté ou analysent une organisation existante alors que les études normatives concernent un phénomène ou une organisation novatrice (pas encore utilisée). Par conséquent, les études optimisant un réseau existant en jouant sur ses paramètres ont donc été classées comme

descriptives. Enfin, nous avons isolé les références concernant l'analyse de la littérature ainsi que les récits d'applications industrielles lorsque le texte ne permettait pas vraiment d'analyser la méthode employée. Il est à noter que pour la suite de l'étude, ce genre de références sera difficilement exploitable, c'est pourquoi les pourcentages en italique ne se réfèrent qu'aux 141 autres articles et non plus au total.

On peut donc constater que, contrairement à celle de Croom et al., notre étude repose essentiellement sur des études théoriques avec 86% des références contre 17% pour [CRO 00]. Comme nous l'avons déjà dit, cette différence vient indiscutablement du fait que nous n'avons quasiment aucune référence en commun et que le type de revues consultées est très différent d'une étude à l'autre. Enfin, nous pouvons remarquer que dans les deux études, les recherches descriptives sont très majoritaires (79% pour nous et 67% pour [CRO 00]), ce qui est normal pour un secteur dont les réalités physiques ne sont pas encore toutes formalisées d'un point de vue théorique.

2.4.2. Structure des modèles

Nous allons maintenant passer à l'étude des structures. Cette étude ne prend en compte que les chaînes logistiques « matérielles ». Par opposition, nous ne traiterons pas le cas des chaînes logistiques « de service » comme celle étudiée dans [AND 99].

2.4.2.a. Statistiques

Pour classer les structures des différents modèles que nous avons trouvés dans la littérature, nous avons utilisé 4 catégories comme le montre le tableau 3. Ce tableau repose sur 114 références car à travers les 167 articles que nous avons lus, tous ne s'appuyaient pas toujours sur une structure clairement exposée. Les quatre catégories de structures qui le composent se définissent de la manière suivante :

- La structure binaire : Dans ce cas, la chaîne logistique est réduite au minimum (à deux sites ou deux niveaux hiérarchiques, typiquement une usine et plusieurs revendeurs).
- La structure de type « chaîne » : Le mot chaîne a ici sa connotation linéaire et cette catégorie concerne donc les structures linéaires de plus de deux niveaux (sinon elles appartiennent à la structure binaire).
- La structure en réseau : Dans cette catégorie, on ne fait pas la différence entre les réseaux convergents, divergents ou mixtes. Par contre on isole dans ce groupe, la sous-catégorie « réseaux avec de l'assemblage » car la partie assemblage représente

apparemment une « marche à franchir » du point de vue résolution du modèle et évaluation de performances.

Structure étudiée	Nombre d'articles
Structure binaire	52 (44%) [AVI 01] [AXS 01] [BAI 00] [BAI 01] [BHA 00] [CAC 00] [CAC 01a] [CAC 01b] [CAC 01c] [CHE 01a] [CHE 01b] [CHE 01c] [CHE 02a] [CHI 03] [COR 01a] [COR 01b] [DEJ 03] [DEL 01] [ERT 02] [GAV 99] [GAV 02] [GJE 02] [HEL 99] [JAI 01] [KAR 02] [KIM 00] [KIM 02a] [KIM 03] [KLA 02] [KOU 02] [LEE 02] [LI 02] [MAH 01] [MOS 00] [RAG 01] [RAG 03] [SCH 98] [TAY 01] [TAY 02] [TEL 01] [TEL 03] [TEM 00] [THO 02a] [THO 02b] [VEE 00] [VIS 01] [WAN 02] [WEN 99] [ZHA 01] [ZHA 02a] [ZHA 02b] [ZIL 99a]
Chaîne (linéaire)	24 (21%) [AXS 03] [BER 99] [CAR 00] [CHE 99] [CHU 01] [COR 01c] [DIM 95] [GAU 00] [GOE 02] [GRA 98] [HAE 02] [KES 01] [LEE 97a] [LEE 99] [LEE 01b] [MUN 01] [PAR 98a] [PAS 00] [RID 02] [THI 01] [THO 02c] [VRO 00] [ZIL 99b] [ZIL 01]
Réseau (arborescent) <i>avec assemblage</i>	23 (20%) [ARC 99] [ARN 95] [BAU 01] [BEA 01] [CAM 97] [COH 88] [ERN 00] [ETT 00] [FEI 99] [GRA 96] [GRA 01] [JAI 99] [JEL 01] [LEE 93a] [LIN 98] [MUL 99] [NIS 00b] [ROB 02] [SRI 01] [TEI 97] [VID 01] [VIS 99] [ZEN 99]
Réseau <i>autres</i>	17 (15%) [AGR 00] [BAG 98] [BER 02] [FLE 01] [GAR 02] [JAN 01] [LEE 01a] [MUK 03] [PAR 99] [PON 02] [POO 94] [RAO 98] [ROY 89] [SWA 97] [SWA 98] [TAL 02] [TIM 00]

Tableau 3 : Structures des réseaux logistiques (116 références)

Nous obtenons ainsi des catégories équilibrées, où les réseaux binaires sont majoritaires avec 44% du total ce qui peut sembler surprenant après notre discours d'introduction mais que nous allons expliquer dans la partie suivante.

2.4.2.b. Analyse des résultats

Nous pouvons tirer plusieurs conclusions de cette étude des structures. Tout d'abord, une analyse brute des chiffres nous montre que les chaînes logistiques les plus étudiées ne sont qu'à deux niveaux. Ce n'est pas l'image habituelle que l'on se fait d'une chaîne logistique. A cela il y a deux explications. Premièrement, nous pouvons observer là l'écart entre les possibilités de modélisation et résolution et la réalité des problèmes. En effet, les chaînes logistiques linéaires ou à deux niveaux utilisées dans ces références (65% des études) ne sont évidemment pas supposées représenter fidèlement la réalité. Les méthodes de résolution sont développées petit à petit sur des modèles très simplifiés au début, l'objectif final étant de pouvoir ensuite traiter un réseau plus complexe. Par exemple dans [CHU 01],

les auteurs n'utilisent qu'un réseau linéaire de manière à appliquer leur procédure mais l'objectif final est de pouvoir traiter le même problème sur une structure plus complexe. Le deuxième cas justifiant la quantité de chaînes logistiques simples est l'étude d'un point très particulier, comme les relations de coopération entre deux maillons de la chaîne comme par exemple dans [TEL 01]. Il est évident qu'on ne prend alors en compte que la partie qui nous intéresse, l'appellation « chaîne logistique » n'ayant plus la même signification que dans notre définition puisqu'elle est très réduite.

Cette analyse nous a également permis d'obtenir des informations dans les deux axes qui nous intéressent : la classification de la littérature et la recherche des caractéristiques classiques d'une chaîne logistique. Pour ce dernier but, nous avons répertorié 40 structures en réseau qui nous ont permis de déterminer quelques caractéristiques fortes. Les réseaux sont souvent composés de plusieurs niveaux, à savoir au minimum des fournisseurs de matières premières, des usines qui les transforment, des centres de stockage pour approvisionner les différents revendeurs qui sont répartis par secteur géographique pour répondre à la demande des clients locaux. Leur structure est arborescente et peut adopter des formes variées. Les usines peuvent en effet utiliser plusieurs fournisseurs qu'elles mettent en concurrence ou plusieurs réseaux de distributions parallèles. De plus, certaines études, comme [SRI 01], insistent sur la notion d'assemblage qui requiert un effort particulier en termes d'évaluation des performances du réseau. Enfin, les transports entre les sites sont un élément important faisant parfois l'objet d'études spécifiques (voir par exemple [BER 99] ou [VRO 00]). Même dans les cas où ils ne sont pas au cœur de l'étude, leur modélisation est à considérer avec attention.

Du point de vue de la classification des études, nous avons pu voir quelques phénomènes intéressants. Par exemple, on peut commencer à faire le rapprochement entre certains réseaux et certains thèmes de recherche. La construction d'un nouveau réseau dans l'industrie, ou son remodelage, implique une étude globale et par conséquent un réseau très complet, donc arborescent (par exemple dans [ARN 95] ou [CAM 97]). A l'opposé, des études sur la coopération entre les acteurs de la chaîne logistique ne se traitent que sur des réseaux de type binaire comme par exemple dans [ERT 02] ou [GJE 02]. Ce type d'indication peut nous servir pour former des familles thématiques. Certains réseaux se démarquent totalement des autres par une structure très différente comme les réseaux logistiques inverses. Dans [FLE 01], la structure du réseau est arborescente mais les sites sont différents des autres exemples. Au lieu des niveaux de fabrication, vente, etc., on trouve des niveaux d'acquisition ou de collecte, de test ou d'évaluation, de réusinage et de redistribution. Le réseau est donc

totale­ment différent et les problèmes liés à cette configuration sont également particuliers. En effet, un deuxième point qui peut rendre des réseaux atypiques est le routage des pièces. Les réseaux inverses se signalent à nouveau avec un routage des pièces qui varie suivant les résultats obtenus au site « test ou évaluation ». On a donc là des questions strictement liées à ce type de réseaux. Un autre secteur se signalant par le routage des pièces est celui des semi-conducteurs (voir par exemple [LEE 01a]). Le routage au niveau de chaque site est caractérisé par un grand nombre de rebouclages (flux réentrant). Enfin, une dernière remarque peut être faite sur la nature des entités circulant dans le réseau. En effet, certaines études considèrent le cas des entités périssables comme [AGR 00]. Ce type de configuration soulève des problèmes particuliers puisqu'il faut gérer le problème des invendus qui sont perdus à partir d'une certaine date (voir par exemple [LEE 01b]).

Nous allons maintenant nous intéresser aux différents paramètres utilisés dans ces études.

2.4.3. Paramètres caractéristiques

Répertorier les paramètres utilisés dans la littérature va nous être doublement utile. Tout d'abord, cela va nous permettre, encore une fois, d'établir les rapports entre certains thèmes de recherche et certains paramètres, car suivant les résultats que l'on attend d'une étude, on ne joue pas sur les mêmes leviers. En second lieu, cela va nous permettre d'identifier les paramètres influents dans une chaîne logistique. En effet, nous voulons par la suite faire de l'évaluation de performance et la justification de l'évaluation de performance est d'aider à prendre une décision, c'est-à-dire choisir la combinaison de paramètres qui convient le mieux à une situation. Pour cela, il faut au préalable savoir sur quels paramètres il est intéressant de jouer, et c'est ce que nous allons voir dans cette partie.

2.4.3.a. Statistiques

Dans cette étude, nous ne prétendons pas avoir relevé de manière exhaustive tous les paramètres de chaque modèle. Les paramètres que nous avons considérés sont les éléments dont une modification se ressent fortement au niveau des performances de la chaîne. Nous avons donc recensé tous ces paramètres importants. Comme ils étaient d'une grande diversité, nous avons essayé de les regrouper par grandes familles, ce qui nous a permis d'obtenir le tableau 4.

Paramètres	Nombre de Références
Relations entre les sites (niveau de partage des informations, type d'informations partagées, gestion contractuelle des invendus, séquence des opérations entre les sites...)	35 [AGR 00] [ARC 99] [AVI 01] [AXS 01] [BAI 01] [CAC 00] [CAC 01c] [CHE 01a] [CHE 01b] [CHE 01c] [CHE 02a] [COR 01a][COR 01b] [ERT 02] [GAU 00] [GAV 99] [GAV 02][GRA 01] [HAE 02] [KHO 02] [KIM 02b] [KIM 03] [KLA 02] [LEE 99] [LI 02] [LIN 98] [PON 02] [RAG 01] [RAG 03] [SCH 98] [SWA 97] [TAY 02] [THO 02a] [WEN 99] [ZHA 02a]
Gestion des stocks (seuils de déclenchement, nombre de kanbans, taille des lots à commander...)	31 [AXS 01] [AXS 03] [BAG 98] [CAC 00] [CAC 01a] [CAC 01b] [CHU 01] [COR 01a] [COR 01b] [DEJ 03] [DIM 95] [ETT 00] [FEI 99] [GAR 02] [GAV 99] [GJE 02] [KAR 02] [LEE 93a] [MAH 01] [MOS 00] [MUK 03] [MUL 99] [MUN 01] [PAR 99] [ROB 02] [TIM 00] [VIS 01] [VRO 00] [WAN 02] [ZIL 99b] [ZIL 01]
Demande extérieure (volume ou variance)	26 [BAU 01] [BEA 01] [BHA 00] [CAC 01b] [COH 88] [ETT 00] [GAU 00] [GAV 02] [JAI 01] [JEL 01] [KIM 00] [KIM 02a] [KOU 02] [LAK 01] [LEE 95] [LI 02] [MUL 99] [PAR 98a] [PAS 00] [SRI 01] [SWA 97] [VIS 99] [ZEN 99] [ZHA 01] [ZHA 02a] [ZIL 99b]
Caractéristiques des sites (temps de traitement des pièces, capacité de production de l'usine, taux de service que l'on se fixe...)	23 [AND 99] [ARN 95] [AVI 01] [BEA 01] [CAC 00] [CHE 99] [ERN 00] [ETT 00] [GRA 96] [GRA 98] [KIM 02a] [LEE 95] [PAR 98a] [PAS 00] [SRI 01] [SWA 97] [TEI 97] [THI 01] [VIS 99] [ZEN 99] [ZHA 01] [ZIL 99b] [ZIL 01]
Structure de la chaîne (nombre d'acteurs, localisation, positions en concurrence...)	17 [CAM 97] [CHE 99] [CHI 03] [COH 88] [COR 01c] [FLE 01] [GOE 02] [JON 02] [LEE 02] [MAH 01] [POO 94] [RAG 03] [RAO 98] [SRI 01] [TAL 02] [VIS 99] [ZIL 99a]
Coûts de fonctionnement (fabrication, stockage, taxes aux frontières, invendus...)	14 [BHA 00] [COR 01b] [ERN 00] [ETT 00] [GAV 02] [GOE 02] [KIM 02a] [LEE 01b] [LI 02] [TAY 01] [TEM 00] [VID 01] [VIS 01] [VRO 00]
Transports (durée, fréquence, capacité)	9 [BEA 01] [BER 99] [DIM 95] [JAN 01] [LEE 95] [ROY 89] [THI 01] [ZIL 99b] [ZIL 01]
Approvisionnement (délai et variance)	7 [BEA 01] [FLE 01] [GRA 96] [JEL 01] [KOU 02] [SWA 98] [ZHA 01]
Caractéristiques du produit (prix de vente, défauts...)	7 [BAI 00] [ERT 02] [GJE 02] [KES 01] [LEE 01b] [THO 02b] [ZHA 02b]

Tableau 4 : Paramètres caractéristiques (109 références)

Nous avons donc réparti les paramètres utilisés dans les 109 articles en neuf catégories. Ces catégories sont :

- Les relations entre les sites comme le niveau de partage des informations, le type d'informations partagées, la gestion contractuelle des invendus, la séquence des opérations entre les sites ou encore les modes de prédiction des demandes.
- Les paramètres de la gestion des stocks comme les seuils de déclenchement, le nombre de kanbans ou encore la taille des lots à commander.
- Les caractéristiques de la demande finale, que ce soit son volume ou sa variance.

- Les caractéristiques des sites eux-mêmes comme le temps de traitement des pièces, la capacité de production de l'usine ou le taux de service que l'on se fixe.
- La structure de la chaîne. C'est-à-dire le nombre d'acteurs, leur localisation, les positions en concurrence.
- Les coûts de fonctionnement, par exemple de fabrication, de réapprovisionnement, de stockage, les taxes aux frontières, les invendus...
- Les transports (leur durée, leur fréquence, leur capacité...)
- Les caractéristiques de l'approvisionnement des sites (délai et variance).
- Et enfin, les caractéristiques du produit comme son prix de vente, ses défauts ou encore le nombre de références.

Certains paramètres ne trouvant pas leur place dans ces catégories, nous avons décidé de ne pas les prendre en compte, considérant que leur occurrence était marginale. De ce fait, et également du fait que certains articles ne se prêtaient pas à ce type d'étude, les résultats du tableau 4, s'appuient sur 109 références. Cependant, si l'on fait le total de toutes ces catégories, on trouve un nombre de références supérieur à 109. En effet, la plupart des études s'appuient sur plusieurs paramètres importants et sont donc classées plusieurs fois dans ce tableau.

2.4.3.b. Analyse des résultats

Comme pour l'étude des structures, nous diviserons nos remarques en deux parties, la classification des études, tout d'abord, et la recherche des caractéristiques d'un réseau logistique, ensuite.

En ce qui concerne la classification de la littérature, certaines études sont totalement caractérisées par les paramètres qu'elles mettent en jeu. Par exemple, certains articles étudient l'effet des paramètres caractérisant le partage des informations entre les sites comme [LI 02] ou [RAG 03] ou encore les paramètres définissant l'organisation à mettre en place pour minimiser le poids des invendus comme dans [LEE 01b] ou [TAY 01]. Dans ces cas-là, la recherche des paramètres nous conduit en même temps à la finalité de l'article. D'autres articles se concentrent par exemple sur les paramètres liés aux transports, comme [BER 99] et [JAN 01], en étudiant les fréquences de livraisons ou encore les tailles de camions les plus adaptées, ce qui les place donc dans une famille à part. Comme nous allons le répéter par la suite, la plupart des articles utilisent les mêmes paramètres. Ainsi, lorsqu'une étude utilise des paramètres inhabituels comme les taxes aux frontières ([VID 01]) ou la variété des références

produites dans la chaîne ([THO 02b]), il est quasiment certain que l'étude des effets de ces paramètres est la motivation de la recherche. Cela permet donc de rapidement « cataloguer » les différents articles et de définir de nombreuses thématiques de recherche, ce qui montre l'intérêt de ce critère dans un système de classification de la littérature.

En ce qui concerne l'identification des caractéristiques importantes des réseaux logistiques, nous avons pu observer que les mêmes paramètres revenaient très souvent. Les paramètres les plus classiques (et qu'il faut donc forcément pouvoir prendre en compte) sont les caractéristiques fonctionnelles de chaque site, les paramètres de gestion des stocks ainsi que la demande finale. La structure de la chaîne fait parfois office de paramètre, lorsqu'on étudie le nombre de sites nécessaires ou leur implantation, par exemple dans [FLE 01] ou encore [GOE 02]. Enfin, pour confirmer cette impression, nous avons pu nous appuyer sur des études dédiées à l'importance des différents paramètres d'une chaîne logistique comme [BEA 01] dans lequel Beamon et Chen identifient la demande et les transports comme des paramètres clés du réseau. En dehors de ces paramètres principaux, il en existe bien sûr d'autres comme nous venons de le voir, mais ils sont moins utilisés.

L'étude concernant les paramètres étant achevée, nous allons continuer notre travail avec l'identification des indicateurs de performances qui nous permettront par la suite de comprendre et de mesurer l'impact de ces paramètres sur la chaîne logistique.

2.4.4. Indicateurs de performance

L'intérêt de répertorier les indicateurs de performances les plus utilisés et les plus efficaces est complémentaire à celui d'étudier les paramètres puisque les effets des uns sont révélés par les autres. Les indicateurs de performances sont donc parmi les caractéristiques importantes des réseaux logistiques.

De plus, Otto et Kotzab ont déjà montré le lien entre certaines thématiques de recherche et les indicateurs de performances dans leur article [OTT 03]. Pour situer brièvement leurs résultats, ils associent à la dynamique des systèmes l'utilisation des moyens, le stock total, le nombre de ruptures, la vitesse de l'information, le temps d'adaptation à un changement dans le volume des demandes (notion de flexibilité) ou bien encore le nombre d'ordres qui finalement ne correspondront à aucune commande réelle. Pour la recherche opérationnelle, ils ont identifié le coût logistique par pièce, le niveau de service ou encore le temps de réponse au client. Le domaine logistique est lui associé au niveau d'intégration, au niveau des stocks, à la flexibilité et à diverses durées comme le temps de fabrication ou le temps de livraison.

L'approche marketing s'appuie sur la satisfaction du consommateur, le coût total du produit ou encore les parts de marché. La partie organisation tourne autour des coûts de transactions, du temps de mise en réseau, de la flexibilité ou encore de la densité de la relation. Enfin, le domaine stratégique utilise des indicateurs comme le retour sur investissement, le « temps de mise sur le marché » ou encore le « temps de mise en réseau ». L'étude de ces indicateurs de performance devrait donc nous aider à établir un quadrillage de la littérature.

2.4.4.a. Statistiques

Tout comme nous l'avions fait pour les paramètres, nous avons relevé les principaux indicateurs de performances utilisés dans la littérature. Ces derniers étaient d'une grande diversité et nous avons encore cherché à les regrouper par familles cohérentes. Nous avons donc fait ressortir trois grands thèmes que nous avons divisés en plusieurs types d'indicateurs. Certains indicateurs n'entrant toujours pas dans ces profils, nous les avons enlevés de ce tableau qui est déjà fort conséquent. Nous en parlerons cependant dans la partie d'analyse pour ne pas négliger les thèmes de recherche qui peuvent y être associés. Une fois les indicateurs marginaux écartés, notre étude repose donc sur 116 références.

Pour construire le tableau 5, nous avons défini trois thèmes majeurs auxquels se rapportent les indicateurs de performances : le client, l'argent et la physique de la chaîne. Dans la catégorie dédiée au client nous retrouvons les indicateurs suivants :

- Le taux de service client. Cette notion est extrêmement vague et nous avons gardé une définition ouverte dans cette étude pour ne pas multiplier les catégories. On retrouve donc associées à cette notion la livraison immédiate au client, la livraison à l'heure convenue ou encore la livraison en bon état.
- Le temps d'attente du client. Dans le cas présent, cela désigne aussi bien la durée normale de livraison au client que le temps de retard.
- Le nombre de ventes totales dont le nom est assez explicite en soit.
- Et les ventes perdues, que ce soit parce qu'il n'y avait pas de produit en stock à proposer au bon moment ou parce que le client a retourné un produit non conforme.

La catégorie concernant l'aspect financier est composée par :

- Le coût total : c'est généralement une fonction prenant en compte plusieurs coûts élémentaires comme les coûts de stockage, de transports, etc.
- Les coûts divers : ce sont les coûts élémentaires qui peuvent être très divers (par exemple les coûts de réapprovisionnement, les coûts de développement de la qualité ou encore des coûts de pénalité pour signaler un mauvais fonctionnement).

- Et enfin le profit qui est la différence entre l'argent gagné et les coûts. Nous avons également inclus dans cette catégorie le prix de vente des produits au client.

Indicateurs de performance	Nombre de références
Liés au client	45
Taux de service client	26 [BEA 01] [CAC 01a] [COH 88] [DIM 95] [ETT 00] [FEI 99] [GJE 02] [GOE 02] [JAI 99] [JAN 01] [JEL 01] [KIM 02b] [LEE 93a] [LEE 95] [LEE 01a] [LIN 98] [PAS 00] [POO 94] [RAO 98] [ROB 02] [SWA 97] [THI 01] [THO 02a] [ZHA 01] [ZIL 99a][ZIL 99b]
Attente du client	8 [ARC 99] [BAU 01] [DIM 95] [MUK 03] [SWA 98] [TEI 97] [TEM 00] [VIS 99]
Ventes totales	6 [ARC 99] [CHI 03] [LEE 02] [RAO 98] [TIM 00] [ZHAO 02b]
Ventes perdues	5 [AND 99] [KIM 02b] [LEE 02] [POO 94] [RAO 98]
Liés à l'argent	89
Coût total	37 [AND 99] [ARN 95] [AXS 01] [BAG 98] [CAC 00] [CAM 97] [CHU 01] [COH 88] [COR 01b] [ERN 00] [FLE 01] [GAV 99] [GAV 02] [GOE 02] [GRA 01] [JAI 01] [JAN 01] [KHO 02] [KLA 02] [LEE 99] [MOS 00] [MUK 03] [MUN 01] [NIS 00b] [PAR 99] [PON 02] [POO 94] [ROY 89] [SWA 97] [SWA 98] [THO 02a] [THO 02b] [TIM 00] [VIS 01] [VRO 00] [WAN 02] [ZEN 99]
Profit	29 [AGR 00] [ARC 99] [BHA 00] [CAC 01c] [CHE 01a] [CHE 01b] [CHI 03] [COR 01b] [COR 01c] [ERT 02] [GAU 00] [GJE 02] [HAE 02] [KIM 00] [KIM 02a] [KLA 02] [LAK 01] [LEE 01b] [LI 02] [MAH 01] [RAG 01] [RAO 98] [ROB 02] [TAY 01] [TAY 02] [TIM 00] [VID 01] [WEN 99] [ZHA 02b]
Coûts divers	23 [AVI 01] [AXS 03] [BAI 00] [BAI 01] [BAU 01] [BEA 01] [BER 99] [CAC 01b] [CHE 01c] [CHE 02a] [ETT 00] [GAR 02] [KAR 02] [KES 01] [KIM 02b] [KIM 03] [LIN 98] [MUK 03] [SCH 98] [TAL 02] [VEE 00] [ZHA 01] [ZHA 02a]
Autres	57
Stocks	27 [AND 99] [ARC 99] [BEA 01] [CAC 01a] [CHE 02a] [COH 88] [DIM 95] [FEI 99] [GAR 02] [GRA 96] [GRA 98] [GRA 01] [JAI 99] [JAN 01] [LEE 95] [LEE 02] [MAH 01] [MUK 03] [PAR 98a] [RID 02] [ROB 02] [SCH 98] [SRI 01] [TEI 97] [VIS 99] [ZIL 99a] [ZIL 99b]
Temps de fabrication total	12 [GAR 02] [JAI 99] [JAN 01] [KIM 02b] [NIS 00b] [ROY 89] [SRI 01] [SWA 98] [THO 02b] [VIS 99] [ZEN 99] [ZIL 01]
Variabilité interne	10 [BAG 98] [CAR 00] [CHE 99] [DEJ 03] [GRA 98] [JAI 01] [LEE 97a] [LEE 97b] [MUL 99] [THO 02a]
Production	5 [COR 01c] [LEE 01a] [PAR 98a] [RID 02] [TAL 02]
Utilisation des ressources	3 [BAU 01] [JAN 01] [LEE 01a]

Tableau 5 : Indicateurs de performance (116 références)

La dernière catégorie rassemble les indicateurs mesurant le fonctionnement de la chaîne logistique comme :

- Les stocks : que ce soit leur niveau, leur rotation ou les moments où ils sont en rupture ou en excédent.
- Le temps de fabrication total, qui est une mesure assez explicite.
- Les variations internes du réseau. Cela concerne les variations de la demande remontant dans le réseau et par conséquent les variations du volume de production.
- La capacité de production : cela peut être la capacité théorique ou les quantités effectivement produites ou éventuellement le débit de la production.
- L'utilisation des ressources, que ce soit les machines, les transports voire même les produits consommables.

Ces catégories nous permettent d'obtenir des résultats assez équilibrés et nous ont été inspirés par les discours sur les objectifs majeurs de la gestion de la chaîne logistique, comme nous allons l'expliquer dans la partie analyse. Tout comme pour les paramètres dans la partie précédente, si l'on fait le total de chaque famille d'indicateurs de performance, on trouve un total supérieur à 116 puisque la plupart des études utilisent plusieurs indicateurs pour tirer des conclusions.

2.4.4.b. Analyse des résultats

Tout d'abord, concernant la classification des références, l'étude des articles à travers les indicateurs de performances permet de faire apparaître quelques clivages. On peut par exemple observer que certaines études sont globales et étudient de nombreuses performances du réseau [LEE 93b] alors que d'autres se concentrent sur un point bien précis comme [ZIL 01] qui étudie le temps total passé dans le réseau par les produits. On peut aussi observer que certains articles portent sur les indicateurs financiers comme les coûts ou le profit alors que d'autres étudient plutôt les aspects physiques de la chaîne, par exemple les stocks. Enfin, tout comme pour les paramètres, on peut identifier des indicateurs de performances classiques. Par conséquent, des études utilisant des indicateurs portant sur l'environnement comme [JON 02] ou la qualité comme [BAI 00] se distinguent du reste des références et sont susceptibles de créer une catégorie à part. Ce critère de classification complète donc les paramètres en renforçant les observations déjà faites et en permettant de nouvelles.

Concernant maintenant l'analyse des caractéristiques des réseaux logistiques, il est bien entendu capital de savoir quels indicateurs de performance présentent un intérêt lors des

études. Ces indicateurs devant faire ressortir les objectifs prioritaires de la gestion de la chaîne logistique, nous les avons donc classés en trois catégories. En effet, l'objectif fondamental de toute entreprise est de faire du bénéfice. Dans le cas d'entreprises vendant des produits, il faut donc attirer (et garder) des clients. Ces principes de base permettent de justifier les catégories choisies :

- L'argent : C'est l'objectif prioritaire d'une entreprise, c'est pourquoi cette catégorie arrive largement en tête de nos résultats. Le bénéfice est cité 29 fois, les coûts totaux ou détaillés apparaissent eux 50 fois ! Dans le cadre de l'étude d'un modèle typique, un indicateur de performance à orientation financière est donc incontournable.
- Le client : Le mot d'ordre des industriels est aujourd'hui : « le client d'abord ». Dans ce contexte de forte concurrence, il est indispensable de connaître les performances du réseau logistique en fonction de ce client. Le taux de service apparaît donc 26 fois, accompagné d'indicateurs comme le temps d'attente occasionné au client ou le nombre de ventes ratées. Le taux de service du client est d'ailleurs souvent cité comme l'indicateur de performance indispensable.
- Le fonctionnement : Les deux objectifs étant donnés (gain financier et satisfaction du client), il faut optimiser le réseau pour y parvenir et on trouve donc naturellement beaucoup d'autres indicateurs permettant d'apprécier les performances du réseau comme l'utilisation des ressources ou la capacité de production. Le niveau des stocks est cité 27 fois. Il faut dire que cet indicateur a une connotation financière (trop de stock est une perte d'argent) mais donne aussi une indication sur le service client (pas assez de stock et le service se dégrade). Enfin le temps total de fabrication est assez peu cité (seulement 12 fois) si l'on considère l'importance de la réactivité dans le marché actuel.

Pour compléter cette étude, nous avons à notre disposition l'enquête de James Keebler sur les indicateurs de performances utilisés par les firmes canadiennes pour mesurer leurs performances logistiques [KEE 00]. Cette étude repose sur un questionnaire qui a été rempli par 335 firmes canadiennes. Ces entreprises ont coché les indicateurs de performances qu'elles utilisaient parmi une liste de 37 propositions. Cette étude ne concerne pas le réseau logistique au sens global mais plutôt l'environnement immédiat de l'entreprise. Les résultats sont tout de même révélateurs. Au centre des préoccupations de ces firmes on retrouve un indicateur de coûts, en particulier le coût d'expédition de la marchandise pour 87.3% des sondés. Viennent ensuite les niveaux de stock avec 85.8% complétés par la rotation des stocks de produits finis (pour éviter l'obsolescence) cités par 80.2% des entreprises. Enfin, et peut-

être surtout, on trouve trois indicateurs sur les relations avec le client : le taux de service avec 80.8% de citations, les livraisons à temps avec 78.6% et les plaintes de la clientèle avec 76.6%. Ces résultats viennent bien conforter notre étude statistique de la littérature même si les termes ne sont pas strictement les mêmes, on retrouve les idées de coûts, de service du client et de niveau de stock en particulier.

L'étude sur les indicateurs de performance étant terminée, nous allons nous intéresser aux méthodes de gestion des chaînes logistiques. Nous concluons ensuite la partie de l'étude sur la classification des articles.

2.4.5. Pilotage du réseau

Nous étudions ici le mode de gestion du réseau logistique. Cette étude ne contribue pas fortement à classer la littérature puisque tous les articles n'utilisent pas forcément un modèle clairement posé et une politique de gestion connue. Par contre, le mode de pilotage est évidemment une caractéristique importante des chaînes logistiques.

2.4.5.a. Statistiques

Cette partie ne porte pas sur l'intégralité des 167 articles. Nous avons recherché les études utilisant des politiques présentées de la manière la plus explicite possible, ce qui nous a conduit à beaucoup de références utilisant des cas d'école. En effet, l'intérêt dans cette partie n'est pas vraiment de faire une étude quantitative mais plutôt qualitative. Nous avons donc fait notre étude en ce sens et avons obtenu les résultats du tableau 6.

Pilotage	Nombre de références
Base Stock	8 [ETT 00] [FEI 99] [GRA 96] [LEE 93a] [MOS 00] [PAS 00] [RAO 98] [SCH 98]
(s, S)	5 [BAG 98] [BEA 01] [GAV 99] [LEE 97a]
(Q, R)	4 [BEA 01] [CAC 01b] [COH 88] [COR 01]
(r, S)	1 [ZIL 01]
Kanbans	5 [DIM 95] [MUL 99] [THI 01] [ZIL 99a] [ZIL 99b]
MRP	4 [CHE 99] [GRA 98] [SAU 99] [TEI 97]

Tableau 6. Politiques de gestion (27 références)

Avant d'analyser ces résultats, nous allons rapidement expliquer ces politiques de gestion des stocks. Il convient tout d'abord de faire la distinction entre les politiques à gestion par seuil ou calendaire. Dans une politique gérée par seuil, on commande une quantité dès que le niveau de stock passe en dessous d'un certain seuil, alors que dans une politique calendaire, la commande a lieu à des intervalles de temps précis. Enfin, il existe des politiques calendaires conditionnelles qui mélangent les deux. On commande donc à date fixe, si le stock est inférieur à un seuil. L'autre critère permettant de qualifier une politique est la quantité commandée à chaque fois. Cela peut être une quantité fixe ou une quantité variable comme par exemple la quantité pour ramener le stock actuel au seuil. Avec ces notions, nous pouvons définir les politiques, en commençant par la plus utilisée :

- La politique (s, S) : Dans cette politique, s représente le niveau de stock en dessous duquel une commande va être passée pour atteindre le niveau S (avec un contrôle continu ou périodique du niveau des stocks). Cette politique est très utilisée (18% dans cette étude) car simple à mettre en œuvre et son optimalité a été démontrée dans des cas simples par Clark et Scarf dans [CLA 60] : Si le contrôle est continu, c'est une politique de type seuil alors que s'il est périodique, c'est une politique calendaire conditionnelle.
- Le « base stock » : C'est un cas particulier de politique (s, S) avec $s = S-1$ et un contrôle continu. C'est une politique de type seuil qui est également très utilisée (29% dans notre étude).
- La politique (Q, R) : Dans cette politique de type seuil, R représente le niveau au-dessus duquel on va essayer de repasser en commandant les pièces par lots de taille Q
- La politique calendaire (r, S) : Dans ce cas là, S représente le niveau que l'on va essayer d'atteindre lors d'une vérification des stocks qui a lieu toutes les r périodes.
- Et enfin le kanban : Dans ce dispositif particulier, la production est gérée par des étiquettes qui garantissent un niveau d'encours borné. Lorsqu'un stock reçoit une demande, il la satisfait (s'il le peut) et lance un ordre de fabrication pour reconstituer son niveau de stock. Cet ordre est une demande pour le stock précédent, donc la demande remonte le long du réseau.

2.4.5.b. Analyse des résultats

Les résultats de cette étude ne permettent évidemment pas de tirer de conclusions sur la réalité physique du problème. Cependant, la politique (s, S) semble assez pertinente

puisqu'elle est utilisée dans plusieurs études industrielles pour modéliser le fonctionnement de l'entreprise étudiée [LEE 93a], [RAO 98]. De plus [LEE 97a], [PAS 00] expliquent que cette gestion est optimale dans le cas de certains réseaux très simples, mais elle est également utilisée pour des systèmes plus complexes car elle présente l'avantage de ne pas être très difficile à implanter. Cependant, on peut remarquer que ces politiques se rapportent à la gestion de chaque stock du réseau alors que dans les articles utilisant le kanban, on considère la gestion du réseau dans sa globalité, chaque site étant alors géré avec un contrôle continu et un système de seuils qu'on essaye d'atteindre en permanence. Comme nous allons le voir par la suite, le kanban peut donc également s'avérer être un moyen de contrôle intéressant.

Nous allons maintenant conclure sur la classification de la bibliographie.

2.5. Conclusions sur la classification de la bibliographie

Pour conclure sur cette partie « clarification et classification de la littérature », nous allons commencer par rappeler la méthode développée par Croom et al. dans une analyse très proche de la notre [CRO 00] et comparer notre cadre avec le leur.

Le système de classement développé par Croom et al. se fait sur deux types de critères : Le contenu et la méthode employée. Le critère portant sur le contenu est en fait une matrice dont la première dimension considère le niveau d'étude et la deuxième les éléments échangés. Le second critère portant sur la méthode est celui que nous avons déjà utilisé au début de cette étude. Il divise donc les articles entre empiriques et théoriques, et normatifs et descriptifs. Comme nous l'avons déjà montré, nous avons travaillé sur des bases très différentes puisque la majorité de leurs références étaient de type empirique alors que les nôtres étaient très majoritairement théoriques.

En dehors de l'aspect « méthode » que nous venons d'évoquer, les critères que nous avons utilisés sont la structure de la chaîne logistique, les paramètres et les indicateurs de performance employés ainsi que les thèmes de recherche. Les résultats peuvent se présenter sous forme de tableau comme nous l'avons fait dans le tableau 7. Ce tableau n'est bien sûr qu'un extrait des résultats complets mais ceux-ci nécessitant une place fort conséquente, nous les avons placés en annexe B.

	Niveau de structure	Paramètres									Indicateurs					Méthode	Thème	Gestion
		Relations sites	Gestion stocks	Demande	Carac. sites	Structure	Coûts	Transports	Appro.	Carac. produits	Service client	Liés à l'argent	Stocks	Temps de fab.	Variabilité			
[BAI 01]	Binaire	X									X					TD	coopération	
[GRA 98]	Chaîne				X							X	X			TD	planification	Poussé
[BER 99]	Chaîne						X				X					TN	transport	
[BAG 98]	Réseau		X								X		X			TD	bullwhip	Tiré
[BEA 01]	Réseau			X	X			X	X		X	X	X			TD	paramètres	Tiré
[JAN 01]	Réseau						X			X	X	X	X	X		TD	évaluation	
[SWA 98]	Réseau							X		X	X		X			TD	modélisation	
[YTT 99]	E(Réseau)	X														ED	environnement	
[TAN 01]																B		

Tableau 7 : Classification multicritère de la littérature

Dans ce tableau, les 9 paramètres sont ceux que nous avons présentés dans le tableau 3 de la partie 2.2.3, soit donc dans l'ordre : les relations entre les sites, la gestion des stocks, la demande, les caractéristiques des sites, la structure, les coûts, le transport, l'approvisionnement et les caractéristiques des produits. Les indicateurs de performance ont été regroupés en familles plus importantes pour des problèmes de visualisation, soit donc dans l'ordre : service du client, indicateurs monétaires, stocks, temps de fabrication, variabilité et enfin production. Les méthodes sont identifiées par leurs premières lettres : Théoriques Descriptives ou Normatives, Empiriques Descriptives ou Normatives et Bibliographiques. Pour les études empiriques, la structure est estimée à partir des sites pris en compte dans le champ de l'étude et notée E(.). Les études bibliographiques reposent essentiellement sur la littérature mais cela n'exclut pas qu'il y ait une petite étude théorique dans la référence. Les thèmes pris en compte sont les thèmes principaux de la partie précédente, à savoir la coopération, l'évaluation de performances, la planification, la modélisation, l'effet Bullwhip, les transports, les études de paramètres, les technologies de l'information et l'Internet. Nous avons rangé les études isolées, non classées précédemment, dans le thème qui leur était le plus proche.

Si l'on compare ce cadre d'étude avec celui de Croom, on trouve plus de ressemblances que de différences. En effet, notre critère sur les structures des réseaux étudiés est l'équivalent du niveau d'étude chez lui. On retrouve trois niveaux de chaînes logistiques prenant chacun en compte de plus en plus de sites. Notre classification considère en réalité quatre catégories

puisque les réseaux ont été scindés en deux parties : avec ou sans assemblage. Cependant, l'esprit de ce critère est le même dans les deux études. La différence sur la classification des réseaux vient seulement du fait que notre étude est plus orientée vers les démarches analytiques qui se sont rapidement révélées très largement majoritaires et que nous avons le double objectif d'également rechercher les caractéristiques majeures des chaînes logistiques. Pour ces deux aspects, il s'est avéré que la notion d'assemblage était un point important. Les autres critères que nous avons pris en compte sont les indicateurs de performance et les paramètres. On peut faire un rapprochement avec l'étude des « éléments échangés » (matière, information, argent...) de Croom et al. puisque ces éléments ont de grandes chances de se retrouver parmi les paramètres importants. De plus, l'identification des indicateurs de performances permet d'affiner l'analyse et de voir si l'étude repose plus sur des flux matériels, informatifs ou monétaires comme c'est le but dans l'étude des éléments échangés. Une fois de plus, nos critères ont été choisis de manière à faire double emploi et à nous permettre en même temps d'identifier les caractéristiques clés d'une chaîne logistique.

Ce type de classification nous a donc permis d'attribuer des caractéristiques marquantes à certaines références comme les études sur la coopération qui statistiquement se concentrent sur une structure binaire et jouent sur des paramètres définissant les relations entre les sites. Ce type d'étude est en train de se structurer fortement d'un point de vue théorique par opposition aux études concernant l'environnement qui, nouveauté oblige, font pour le moment plus l'objet d'études empiriques. Nous pouvons aussi facilement identifier les études sur les transports à travers des paramètres comme le temps de transport ou encore la capacité. Les études sur l'analyse de paramètres se caractérisent par un grand nombre de paramètres et d'indicateurs de performances utilisés. Cela les place comme « cousines » des études d'évaluation de performance et d'optimisation qui ont des caractéristiques très similaires. Toutes ces réflexions sont illustrées par le tableau 7 et l'annexe B.

Ainsi, la conjugaison de ces critères permet de quadriller l'espace de la littérature et de positionner les articles les uns par rapport aux autres, ce qui était un des objectifs de cette thèse. Nous allons maintenant nous intéresser de manière plus précise aux études théoriques dont la connaissance nous sera utile dans les chapitres suivants.

2.6. Etudes théoriques

Les études théoriques représentent une grande partie de notre base de données. Nous allons donc nous y intéresser de manière plus précise. Pour cela nous allons séparer les méthodes analytiques des études par simulation. Notre attention portera tout particulièrement sur les possibilités des méthodes d'évaluation de performance que nous détaillerons à la fin de cette partie.

2.6.1. Méthodes analytiques

L'intérêt des méthodes analytiques est leur grande vitesse de résolution. En effet, lorsqu'on envisage de faire un changement sur la chaîne logistique, les décisions prises vont conduire à des dépenses très élevées. Il est donc préférable de faire des études préliminaires très complètes et de multiplier les configurations testées. Dans cette optique, les méthodes analytiques peuvent être d'une grande utilité avec leurs temps de calcul très réduits.

Nous allons tout d'abord commencer par une étude assez similaire à la première partie, mais de manière plus ciblée. Nous allons en effet répertorier les thèmes traités par les méthodes analytiques ainsi que les niveaux de structures utilisées. Cette étude nous permettra d'évaluer, parmi tous les thèmes et les domaines liés aux réseaux logistiques, les possibilités actuelles des méthodes analytiques.

2.6.1.a. *Thèmes traités*

Le tableau 8 présente les différents sujets traités par les méthodes analytiques. Les thèmes majeurs restent les mêmes, à savoir la coopération, l'évaluation de performances des réseaux, dans des cas industriels ou académiques, et la planification. La coopération est très largement traitée par les méthodes analytiques puisque l'intérêt de ces études est de bien comprendre les mécanismes conditionnant la chaîne logistique. C'est pourquoi cette catégorie est quasiment autant représentée que lors de l'étude globale de la partie précédente (31 références). Au delà de ces grands thèmes, les méthodes analytiques semblent en mesure de répondre à de très nombreux problèmes parmi ceux que nous avons vus dans la première partie puisque l'on retrouve des études moins citées comme l'effet « Bullwhip » dans [LEE 97a] ou encore les utilisations d'Internet dans [CHI 03].

Thèmes abordés	Références concernées
Coopération : <ul style="list-style-type: none"> • Fournisseur/ Revendeur • N fournisseurs/ Usine • Usine/ N revendeurs • Chaîne 	31 [AGR 00] [AVI 01] [AXS 01] [BAI 00] [BAI 01] [CAC 01b] [COR 01a] [DEL 01] [ERT 02] [GAV 99] [GAV 02] [GJE 02] [HOM 00] [KIM 00] [MOS 00] [PAS 00] [RAG 01] [TAY 01] [TAY 02] [WEN 99] [ZHA 02b] [CHE 01c] [CAC 00] [CAC 01c] [CHE 01a] [CHE 01b] [KLA 02] [RAG 03] [VIS 01] [GAU 00] [MUN 01]
Evaluation de performance et optimisation : <ul style="list-style-type: none"> • Cas industriels • Cas d'école 	13 [ARN 95] [CAM 97] [LEE 93a] [LEE 93b] [LEE 95] [RAO 98] [ZIL 99a] [COH 88] [DIM 95] [ETT 00] [SRI 01] [VID 01] [VIS 99]
Planification	13 [BER 02] [CHU 01] [FRE 01] [GRA 96] [GRA 98] [KHO 02] [KIM 02a] [MAR 93] [MUK 03] [PAR 99] [ROB 02] [THO 02c] [TIM 00]
Effet Bullwhip	5 [BAG 98] [CAR 00] [DEJ 03] [LEE 97a] [WU 98]
Transports	5 [BER 99] [CHE 02a] [GRA 01] [ROY 89] [VRO 00]
Analyse de paramètres	3 [CAC 01a] [RID 02] [ZIL 99b]
Internet	3 [CHI 03] [LEE 02] [ZEN 99]
Compétition	3 [COR 01c] [LI 02] [MAH 01]
Modélisation	2 [LEE 01a] [SIM 01]

Tableau 8. Thèmes traités par les méthodes analytiques (78 références)

Les possibilités des méthodes analytiques semblent donc importantes en termes de thèmes, nous allons étudier dans le paragraphe suivant leurs possibilités en termes de structures.

2.6.1.b. Structures

Les résultats de l'étude sur les structures sont présentés dans le tableau 9. On observe sensiblement la même tendance que lors de la première phase d'étude, c'est-à-dire une domination des structures « simples ». Ce phénomène est même renforcé puisque les structures binaires représentent plus de la moitié des modèles à elles seules. Si on les regroupe avec les structures linéaires, on obtient les trois quarts des références. Les méthodes analytiques sont donc généralement utilisées sur des structures simplifiées.

Associé à ces structures, le base stock reste la gestion la plus courante (même si on parle alors de la gestion des sites et non pas de la gestion du réseau dans son ensemble comme avec le kanban). A noter enfin que les structures les plus complexes sont plutôt associées à des

problèmes d'évaluation de performance alors que les structures simplifiées se rapportent à des études plus ciblées où on cherche d'abord à montrer un phénomène sur un modèle simple comme les relations entre le fournisseur et ses revendeurs dans [CAC 01b]. Les possibilités des méthodes analytiques en termes de structure semblent donc adaptées à des études simples.

Structure étudiée	Nombre d'articles
Structure binaire	45 (52%) [AVI 01] [AXS 01] [BAI 00] [BAI 01] [BHA 00] [CAC 00] [CAC 01a] [CAC 01b] [CAC 01c] [CHE 01a] [CHE 01b] [CHE 01c] [CHE 02a] [CHI 03] [COR 01a] [DEJ 03] [DEL 01] [ERT 02] [GAV 99] [GAV 02] [GJE 02] [JAI 01] [KAR 02] [KIM 00] [KIM 02a] [KIM 03] [KLA 02] [KOU 02] [LEE 02] [LI 02] [MAH 01] [MOS 00] [RAG 01] [RAG 03] [TAY 01] [TAY 02] [TEM 00] [THO 02a] [THO 02b] [VEE 00] [VIS 01] [WAN 02] [WEN 99] [ZHA 02b] [ZIL 99a]
Chaîne (linéaire)	20 (22%) [AXS 03] [BER 99] [CAR 00] [CHU 01] [COR 01c] [DIM 95] [GAU 00] [GRA 98] [HAE 02] [LEE 97a] [LEE 99] [LEE 01b] [MUL 99] [MUN 01] [PAS 00] [RID 02] [THO 02c] [VRO 00] [ZIL 99b] [ZIL 01]
Réseau (arborescent) avec assemblage	13 (16%) [ARN 95] [CAM 97] [COH 88] [ERN 00] [ETT 00] [GRA 96] [GRA 01] [LEE 93a] [ROB 02] [SRI 01] [VID 01] [VIS 99] [ZEN 99]
Réseau autres	8 (10%) [AGR 00] [BAG 98] [BER 02] [LEE 01a] [MUK 03] [PAR 99] [RAO 98] [ROY 89]

Tableau 9. Structures liées aux méthodes analytiques (86 références)

Nous allons maintenant nous intéresser aux études concernant l'évaluation de performance des réseaux logistiques.

2.6.2. Méthodes d'évaluation de performance

2.6.2.a. Méthodes analytiques

Les méthodes d'évaluation de performance ont déjà été recensées dans la partie 2.2.2. Cependant, nous n'en avons retenu qu'un petit nombre dont les références sont rappelées dans le tableau 10. En effet, à partir de toutes les méthodes d'évaluation de performances que nous avons listées dans la présentation des thèmes, nous enlevons celles par simulation pour ne garder que les méthodes analytiques. Nous nous concentrons sur les études d'évaluation de performance, ce qui élimine les études d'optimisation par programmation linéaire. Enfin, nous enlevons également les études dont la méthode n'est pas suffisamment détaillée pour être étudiée avec précision. Finalement nous obtenons les 6 méthodes du tableau 10. Ces méthodes s'appliquent toutes à des réseaux assez développés, c'est-à-dire au moins linéaires. On

constate également que toutes ces études concernent des modèles gérés en flux tiré avec des indicateurs de performance classiques comme le taux de service, le coût du réseau, le niveau des stocks ou encore le temps de fabrication. Par ailleurs, on peut remarquer que plusieurs de ces études font appel, au moins ponctuellement, à la théorie des files d'attente.

Ces études des réseaux logistiques se démarquent par la taille du réseau étudié, qui met en œuvre un grand nombre d'acteurs pouvant être indépendants. Les aspects communications et gestion des informations dans le réseau sont également importants. D'autres facteurs caractérisent ce type d'étude comme l'importance des transports, l'incertitude du contexte, l'aspect « géographique » de certaines études.

Référence	Caractéristiques de la méthode			
	Réseau	Politique	Indicateurs	Outils
[COH 88]	Réseau avec assemblage	Flux tiré : (Q, R)	Coûts, stocks, service client	Sites en files d'attente
[DIM 95]	Chaîne	Flux tiré : Kanbans	Stocks, service client	Réseau de files d'attente
[ETT 00]	Réseau avec assemblage	Flux tiré : Base stock	Taux de service, niveau de stock	Sites en files d'attente
[LEE 93a]	Réseau avec assemblage	Flux tiré : Base stock	Taux de service, niveau de stock	Divers modèles stochastiques
[RAO 98]	Réseau	Flux tiré : Base stock	Coûts, profit, niveau de stock, service	Décomposition/ I.P.A. ⁶
[SRI 01]	Réseau avec assemblage	Flux tiré : Fabrication à la demande	Temps de fabrication, stock	Réseau de files d'attente

Tableau 10 : Les méthodes analytiques d'évaluation de performance

Comme nous l'avons vu, dans [DIM 95] les auteurs étudient un réseau linéaire géré en kanbans dont le centre d'intérêt est le transport. Deux méthodes sont utilisées pour étudier ce système, une en temps discret et une en temps continu se basant sur une décomposition du réseau et permettant de déterminer les encours et le taux de service du client. Le but de cette étude est de guider un industriel dans le choix de l'implantation d'une usine. Les performances de trois implantations possibles sont donc étudiées en termes d'encours et de taux de service client pour aider l'industriel à faire un choix.

Dans [COH 88], les auteurs étudient un réseau qu'ils décomposent en quatre sous-systèmes. Ces sous-systèmes représentent les fonctions d'approvisionnement, de fabrication, de stockage et de distribution. Les stocks du sous-système « approvisionnement » sont gérés en (R, nQ), les produits finis en (R, Q) et les centres de distribution en (s, S). La méthode consiste à analyser successivement de manière approximative et stochastique les différents

sous-systèmes pour obtenir finalement le coût pour l'ensemble et le service du client final. Ce modèle permet donc l'analyse de stratégies de gestion différentes en s'appuyant sur les indicateurs de performance que sont les coûts et le niveau de service, qu'on étudie dans le cas stationnaire. Un réseau du même type est étudié dans [LEE 93a]. Il est tiré d'un réseau réel de Hewlett Packard. Les stocks sont ici gérés en base stock. Pour étudier ce réseau, on le décompose en unités identiques avec un stock d'entrée, une partie opérative et un stock de sortie. On étudie entre autres le taux de service client et les coûts de stockage dans des problèmes stochastiques. Ce modèle a été utilisé à HP pour analyser la pertinence des niveaux de stock actuels, évaluer les gains de meilleurs approvisionnements, évaluer les moyens de transport pour livrer les produits finis, analyser les effets de l'introduction d'un nouveau produit. De nombreuses pistes de développement ont été déterminées à partir de cet article, comme pouvoir prendre en compte la rupture de plusieurs pièces simultanément, modéliser les effets de congestion dans les stocks, adapter le modèle à de la production à la demande ou encore optimiser le mode de recherche des niveaux de stocks optimaux. C'est ce qui a été fait dans [ETT 00] dont la méthode ressemble à celle utilisée dans [LEE 93a]. Cependant, la méthode repose maintenant sur la détermination du temps réel passé dans les stocks en utilisant une modélisation par une file d'attente de type $M^X/G/\infty$ (arrivée poissonnienne par lots de taille X, traitement par une infinité de serveurs suivant un processus général) mais surtout la partie optimisation est plus développée. Pour optimiser le réseau, on choisit le taux de service client désiré et le modèle nous donne les différents niveaux de base stock à utiliser dans le réseau (en limitant les coûts). Ce modèle peut donc servir d'aide à la décision pour le réglage de réseaux logistiques. Dans [SRI 01], les auteurs étudient un réseau arborescent avec assemblage géré en fabrication à la demande (gestion que Lee et Billington désiraient mettre en œuvre dans leur modèle [LEE 93a]). Ils utilisent une modélisation par réseaux de files d'attente et la méthode de résolution utilise la méthode approximative de Whitt [WHI 83] ainsi qu'une représentation par files de type GI/G/1 (arrivée et traitement de types généraux) aux divergences. On ne prend pas en compte la taille des lots. Les performances calculées sont le délai de livraison et le niveau de stock. Une entreprise peut donc utiliser ce type d'approche pour étudier l'effet de modifications sur les performances de son réseau.

Enfin, l'étude de Rao et al. [RAO 98] est un peu différente puisque l'analyse du réseau est liée à sa conception et que l'aspect optimisation est donc assez présent dans la démarche. Dans cette étude effectuée à Caterpillar, on scinde le problème en deux parties qui sont le

⁶. I.P.A. : Analyse par perturbation infinitésimale

roulage des pièces et la gestion des stocks. Le premier problème est réglé avec des outils issus de la recherche opérationnelle comme la recherche du plus court chemin, alors que la gestion des stocks est traitée par décomposition du système et utilisation de plusieurs outils, y compris d'ailleurs la simulation puisqu'on effectue une optimisation par IPA. Cette étude a permis de mettre en place le réseau logistique d'un nouveau produit en s'appuyant principalement sur le taux de service client et les différents coûts du réseau.

Toutes ces méthodes permettent d'obtenir des résultats dans des délais relativement courts au vu de la complexité des systèmes traités. Nous allons maintenant étudier le type d'études effectuées par des techniques de simulation.

2.6.2.b Evaluation de performance par simulation

Nous avons répertorié les références concernant l'évaluation de performance par simulation dans le tableau 1 (et de manière plus précise en annexe A). Nous nous sommes donc intéressés de près à ces cinq références dont les principales caractéristiques sont consignées dans le tableau 11. On peut observer que toutes ces études concernent des structures complexes et que la plupart sont gérées en flux tiré, ce qui est similaire aux études par les méthodes analytiques. Les indicateurs de performances sont généralement assez nombreux, sauf dans [JEL 01] où l'on se concentre sur le taux de service, mais ils peuvent être considérés comme « classiques » au vu des résultats de notre étude sur les caractéristiques des réseaux logistiques. Seul [JAN 01] se distingue car l'étude ne portant que sur la partie distribution, les indicateurs sont l'utilisation des transports, la distance parcourue ou encore le coût ramené à un container.

Référence	Caractéristiques de la méthode			
	Structure	Politique	Indicateurs	Outils
[ARC 99]	Réseau	Flux poussé, base stock	Rotation des stocks, profit, retards...	IBM supply chain analyser
[BAU 01]	Réseau	Flux tiré	Temps de séjour, coûts, utilisation ressources...	HIT (simulation à évènement discret)
[JAN 01]	Réseau de distribution	Flux tiré	Coûts, utilisation du transport, livraison à temps...	Arena
[JEL 01]	Réseau	Flux tiré : (s, S)	Taux de service	Monte Carlo
[UME 98]	Réseau	Flux poussé puis tiré	Coûts, temps de fabrication, utilisation des ressources, débit...	Développement du Virtual supply chain management system

Tableau 11 : L'évaluation de performance par simulation

La principale motivation pour utiliser la simulation est l'analyse précise de la dynamique des systèmes comme dans [JAN 01] et [UME 98]. Les outils divergent d'une étude à l'autre : Arena est utilisé dans [JAN 01], HIT dans [BAU 01] et l'IBM Supply Chain Analyser dans [ARC 99] alors qu'un outil spécifique est développé dans [UME 98]. Enfin les études se séparent entre les cas d'études académiques comme [ARC 99] ou [BAU 01] et les études industrielles comme [JAN 01]. L'objectif est toujours d'apporter des informations au décideur au moment où il doit modifier un aspect de sa chaîne logistique. Ainsi dans [ARC 99], les auteurs testent 5 configurations de leur réseau pour choisir celle qui offre les meilleurs résultats financiers. Ces configurations varient en fonction de la quantité transportée lors des liaisons entre les sites, des changements dans la gestion des stocks ou encore du partage d'information entre les acteurs. Dans [JEL 01], on cherche les paramètres de seuils des stocks qui permettront d'avoir un taux de service donné et dans [UME 98], l'objectif est de réduire les temps de fabrication et d'optimiser l'utilisation des ressources. Enfin, dans [JAN 01], les auteurs utilisent leur logiciel pour étudier l'impact d'une nouvelle distribution des produits dans le secteur alimentaire par des camions spécialement aménagés avec plusieurs compartiments. Ils observent donc les effets produits sur les coûts, le temps de transport, le nombre de livraisons à temps, le chargement des camions, la distance parcourue ou encore le niveau de stock.

Là encore, ces études se démarquent par le type de rapport entre les acteurs du réseau et le contexte particulier de la chaîne logistique.

2.7. Conclusions sur les caractéristiques des réseaux logistiques

Au cours de l'étude de la littérature, nous avons essayé de rassembler des indications sur les caractéristiques majeures des chaînes logistiques. Nous pouvons tirer de cette étude les conclusions suivantes.

Certains réseaux, comme la fabrication des semi-conducteurs ou les réseaux inverses, ont des caractéristiques très différentes des autres cas, il n'existe donc pas de structure « universelle ». La plupart des réseaux ont tout de même certaines caractéristiques en commun comme les différents niveaux : fournisseurs de matières premières, usines qui les transforment, centres de stockage et différents revendeurs pour répondre à la demande des clients soit donc quatre niveaux. Les réseaux les plus représentatifs sont arborescents, les usines ayant plusieurs fournisseurs et de l'assemblage étant pratiqué à un moment de la conception. Ces caractéristiques ne sont donc finalement pas très éloignées des structures

classiques des systèmes de production (hormis l'aspect transports et transmission d'informations). Cependant, les réseaux logistiques se démarquent par le type d'étude qui est mené et par le contexte dans lequel sont placées ces structures. Ce contexte va influencer sur la manière dont est géré le réseau ("fabrication pour stock", "fabrication à la commande"...) et sur le poids attribué à chaque partie du réseau. Enfin, ce qui caractérise peut-être le plus ce contexte, c'est l'incertitude. En effet, une grande incertitude repose souvent sur le volume des demandes, la fiabilité des approvisionnements (qualité, date...) ou même le procédé industriel (baisses de rendement).

Les paramètres les plus significatifs nous ont semblé être ceux concernant la politique de gestion des stocks ainsi que le fonctionnement global de la chaîne (organisation des sites entre eux). Les autres paramètres importants sont les caractéristiques de chaque site, les temps de transports entre ces sites ainsi que la demande. Le choix des indicateurs de performance semble lui aussi assez clair avec le taux de service du client final, une fonction de coût du réseau, les niveaux de stockage ainsi que le délai de fabrication pour estimer la réactivité.

Forts de ces enseignements, nous sommes prêts à aborder le chapitre 3 et à construire un modèle « typique » de chaîne logistique comme nous allons le définir au chapitre suivant.

2.8. Synthèse de l'étude bibliographique

Dans ce deuxième chapitre, nous avons défini une chaîne logistique comme un réseau de sites, indépendants ou pas, participant aux activités d'approvisionnement, de fabrication, de stockage et de distribution liées à la commercialisation d'un produit. Nous avons identifié trois types de structures : convergente, divergente ou mixte, ce qui nous permet d'affirmer que nous sommes en présence d'un réseau et non d'une chaîne. Cependant, le terme chaîne logistique est déjà tellement entré dans les mœurs de la communauté scientifique qu'il nous arrivera de l'utiliser. Nous avons également décrit les flux traversant une entreprise, à savoir les flux matériels, d'information et monétaires puis nous avons rappelé les trois niveaux de décisions classiques (stratégique, tactique et opérationnel), ces deux notions étant utiles dans la suite de l'étude.

Après ces quelques remarques, nous avons procédé à une étude de la littérature sur les chaînes logistiques. Cette étude avait comme double objectif de fournir un cadre d'étude de la littérature mais aussi d'accumuler des renseignements sur les caractéristiques des réseaux logistiques. Pour cela, nous avons constitué une base de données de 167 références dont les

thèmes sont très variés. Nous avons détaillé les principaux, comme par exemple la coopération dans le réseau ou les études d'évaluation de performance.

Nous avons ensuite procédé à l'analyse de cette littérature en commençant par le type d'étude : empirique ou théorique. Ceci nous a permis de nous positionner par rapport à une étude très proche de la notre publiée pendant le déroulement de cette thèse par Croom et al.. Nous avons pu observer que nos références bibliographiques étaient très différentes puisque les leurs sont majoritairement empiriques alors que les nôtres sont majoritairement théoriques. Ce résultat était envisageable dès le début puisque nous n'avons quasiment aucune référence en commun. Nous avons ensuite utilisé des critères comme la structure des réseaux, les paramètres et les indicateurs de performances utilisés pour, à la fois construire un cadre d'étude de la littérature sur les chaînes logistiques, mais également relever des informations concernant les caractéristiques des réseaux. Nous avons finalement pu vérifier que nos critères permettaient de définir efficacement l'espace de la bibliographie en faisant apparaître des clivages parmi les références. Nous avons illustré cela sur quelques exemples comme les études sur la coopération entre les sites qui se caractérisent par leurs paramètres particuliers, leurs structures binaires et des études largement théoriques. De plus, une comparaison avec l'étude de Croom et al. nous a montré que même développées dans des conditions différentes, les deux études aboutissaient à des cadres très proches, s'appuyant sur le niveau d'étude ainsi que sur les éléments pris en compte dans le réseau. Concernant l'étude des caractéristiques marquantes d'une chaîne logistique, nous avons retenu que les réseaux étaient arborescents, avec de l'assemblage, présentaient des niveaux clés comme les fournisseurs, les fabricants, les distributeurs et utilisaient des paramètres concernant la gestion des stocks ou les caractéristiques des sites. Nous avons également identifié les principaux indicateurs de performances comme le taux de service du client final, le coût du réseau ou le profit qu'il génère, les niveaux de stockage et le délai de fabrication. Enfin, nous avons observé que les politiques de contrôle étaient majoritairement à flux tiré.

Nous nous sommes ensuite intéressés aux méthodes analytiques et plus précisément aux techniques d'évaluation de performance.

Chapitre 3

Intérêt des méthodes analytiques pour l'étude des réseaux logistiques

Lorsque les industriels veulent modifier leur réseau logistique, ils doivent réaliser des études préliminaires. Pour cela, on peut utiliser la simulation qui donne des résultats précis avec un temps de calcul long ou des méthodes analytiques qui se caractérisent par une solution généralement approximative obtenue dans des délais extrêmement courts. L'objectif de cette partie va donc être de montrer comment les méthodes analytiques peuvent aider à analyser une chaîne logistique et apporter des informations nécessaires lors de sa modification. Cette étude a fait l'objet d'une présentation à la 17^{ème} conférence de l'IAR [CHE 02c].

Pour cela, nous allons utiliser dans ce chapitre les résultats de la partie précédente pour construire un modèle typique de chaîne logistique. Nous allons ensuite évaluer les performances de ce modèle avec une méthode analytique développée au LAG [DEA 94] et implantée dans le logiciel Palkan. Pour choisir nos paramètres et indicateurs de performances, nous utiliserons une fois de plus les données de l'étude bibliographique. L'étude sera divisée en deux parties : une étude sur le rôle de chaque paramètre isolément et une variation simultanée de tous ces paramètres. Cette observation de l'influence des paramètres de la chaîne sur ses performances dans un environnement stochastique nous permettra de dégager des principes utiles à la prise de décision stratégiques ou tactiques au moment de concevoir ou modifier une chaîne logistique.

Scribitur ad narrandum, non ad probandum...

3.1. Introduction

Les industriels peuvent travailler sur leur réseau logistique dans deux cas : soit ils veulent améliorer les performances de leur réseau actuel, soit il veulent en développer un nouveau (pour cause d'expansion géographique, d'élargissement de la gamme ou de création d'un nouveau marché par exemple). Dans les deux cas, les dépenses engagées vont être très importantes et des études préliminaires sont donc indispensables pour utiliser ces sommes à bon escient. Dans ces études, il faut évaluer les performances du réseau actuel ou de celui en projet. Pour cela, on peut utiliser la simulation ou des méthodes analytiques qui, outre une solution (généralement approximative) obtenue dans des temps extrêmement courts, apportent à l'étude un intérêt pédagogique indéniable. Ce type d'outil paraît donc tout indiqué pour traiter les chaînes logistiques dont la taille importante entraîne des résolutions par simulation très complexes.

L'objectif de cette partie est donc de montrer comment les méthodes analytiques peuvent aider à analyser une chaîne logistique et apporter des informations nécessaires lors de la création d'un nouveau réseau ou de la modification d'un réseau déjà existant.

Au chapitre précédent, nous avons passé en revue quelques méthodes d'évaluation de performance. Nous avons vu que dans [COH 88], [LEE 93a] et [ETT 00], le problème était scindé en plusieurs sous-problèmes que l'on résolvait l'un après l'autre avec des méthodes différentes. A l'opposé, dans [DIM 95] et [SRI 01] on modélise l'intégralité de la chaîne logistique en un réseau de files d'attente que l'on résout ensuite (même si des techniques de décomposition sont utilisées dans la résolution globale). Cette modélisation en files d'attente fait d'ailleurs partie des techniques utilisées dans les résolutions par décomposition du problème, ce qui nous a conforté dans notre choix de ce type de résolution dans cette thèse. Dans ces études, les méthodes analytiques ont apporté leur rapidité ainsi qu'une démarche pédagogique de compréhension du système étudié.

Pour illustrer l'intérêt des méthodes analytiques dans l'évaluation de performance des chaînes logistiques, nous nous proposons d'étudier un modèle typique de réseau logistique et d'essayer d'analyser les effets de ses principaux paramètres. De telles études ont déjà été entreprises [BEA 01], [CAC 01a], [DAV 02], [RID 02] et [ZIL 99b]. Parmi ces études, seules celles de Beamon et Chen et Zillus et Di Mascolo sont totalement orientées sur l'étude de l'importance de chaque paramètre du réseau. Dans [CAC 01a], l'étude de l'influence du paramètre lié à la gestion des stocks n'est qu'une partie de l'étude, dans [RID 02] on se

concentre sur les effets dynamiques des paramètres sur l'amplification de la demande dans une chaîne linéaire (effet Bullwhip) et dans [DAV 02], les auteurs effectuent une étude empirique sur l'effet de la politique de gestion du produit sur les performances financières d'une entreprise. L'analyse que nous allons faire peut donc être considérée comme une extension de [ZIL 99b] et [MUL 99] puisque nous allons réaliser le même type d'étude mais sur un réseau plus représentatif d'une chaîne logistique alors que leurs études concernaient une chaîne linéaire. Nous allons donc pouvoir observer l'influence des paramètres de la chaîne sur ses performances dans un environnement stochastique. Nos observations nous permettront de dégager des principes utiles à la prise de décisions stratégiques ou tactiques au moment de concevoir ou modifier une chaîne logistique.

3.2. Construction du modèle d'étude

Dans cette partie, nous construisons le modèle typique de chaîne logistique que nous allons étudier par la suite. Pour cela, nous utilisons les résultats de l'étude effectuée au chapitre 2.

3.2.1. Présentation de la structure typique d'un réseau logistique

Les informations recueillies au chapitre 2 sur la structure des chaînes logistiques rencontrées dans la littérature nous permettent de définir une structure typique pour un réseau logistique : c'est-à-dire la structure la plus simple possible qui contient néanmoins les caractéristiques principales d'une chaîne logistique (figure 3). Ce réseau est convergent en amont (partie fabrication) et divergent en aval (partie distribution). Il consiste en une usine centrale, appelée « Usine d'assemblage » qui assemble des produits semi-finis fabriqués en amont par les usines 1 et 2. L'usine 2 se procure sa matière première chez le fournisseur 3. L'usine 1, elle, utilise deux fournisseurs (fournisseur 1 et 2) pour obtenir sa matière première. La répartition entre les deux fournisseurs est ajustable et peut donc dépendre de leurs caractéristiques propres. Dans la partie aval de l'assemblage, les produits sont répartis entre deux centres de distribution, situés dans deux régions géographiques très distinctes. Ces centres de distribution servent à approvisionner les revendeurs qui répondent à la demande du consommateur final. Ces consommateurs sont considérés par zone géographique (zone 1, 2 et 3). Les liens entre tous ces éléments sont assurés par des moyens de transport, par exemple le camion.

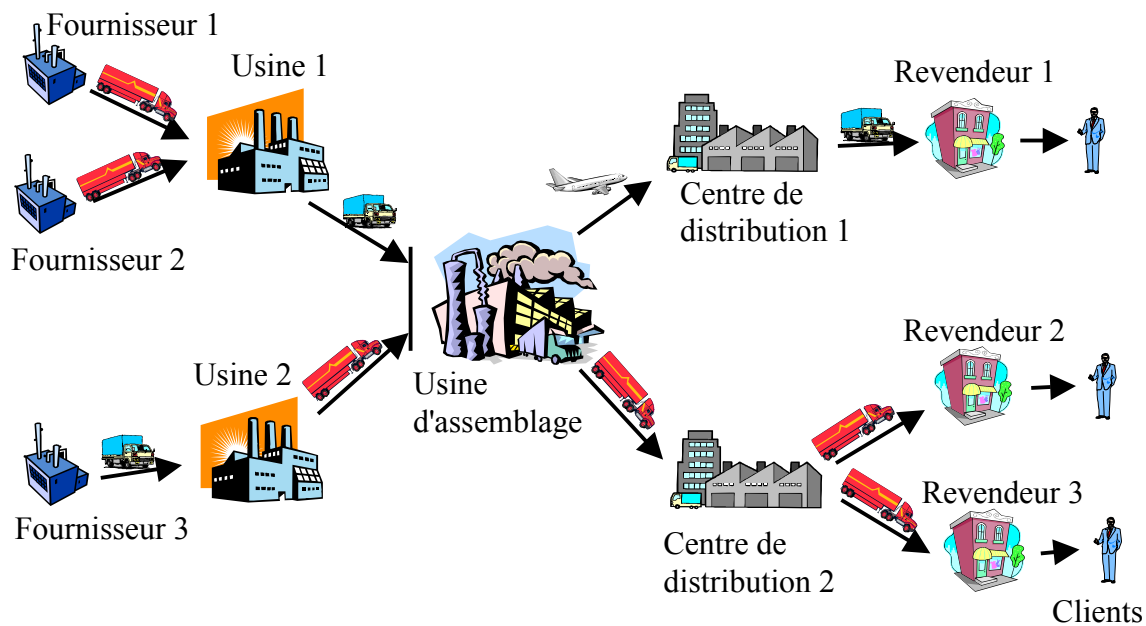


Figure 3 : Structure typique d'un réseau logistique

Nous avons choisi un fonctionnement en flux tiré, par kanbans, pour l'intégralité du réseau, c'est-à-dire que les demandes du client final remontent le long du réseau en déclenchant les actions adaptées (ordres de fabrication par exemple). La demande réelle du client final, n'est vue que par les revendeurs, ce qui est encore le cas le plus réaliste à l'heure actuelle, et il y a donc une relation client/ fournisseur entre les autres sites. Chaque site n'a de contact qu'avec le site placé un rang en amont et celui placé un rang en aval. Par exemple, le centre de distribution 2 ne connaîtra jamais la demande du client. Pour lui, ses clients sont les revendeurs 2 et 3 et il s'approvisionne à l'usine d'assemblage. Le partage d'informations correspond donc à celui d'une entreprise standard qui ne s'est pas équipée d'un réseau de communication global (avec l'utilisation de « hubs » pour centraliser l'information par exemple). Nous traiterons d'autres systèmes d'informations, dont le hub, au chapitre 5.

Il faut bien souligner que ce modèle typique n'est pas issu d'un cas industriel et qu'il n'a aucune réalité physique. C'est simplement l'assemblage des caractéristiques essentielles de la plupart des chaînes logistiques comme nous l'avons étudié au paragraphe 2.6. Avant de passer à la modélisation de cette chaîne logistique par un réseau de files d'attente au paragraphe 3.2.3, nous allons maintenant expliquer le principe de la méthode d'étude que nous allons utiliser et ses limitations.

3.2.2. Présentation de la méthode analytique utilisée

Dans cette partie, nous allons présenter rapidement le principe de la méthode analytique que nous allons utiliser pour étudier notre modèle. Cette méthode a été implémentée dans un logiciel nommé Palkan développé au LAG [DEA 94]. C'est ce logiciel qui a déjà été utilisé dans [ZIL 99b] mais nous allons ici essayer de lui faire traiter une structure plus complexe. Palkan est adapté à notre étude car, bien que développé à l'origine pour l'évaluation de performances des systèmes de production, il permet d'étudier avec des temps de calculs extrêmement faibles tout réseau modélisé par des files d'attente et géré en kanban, sous réserve de répondre à quelques critères que nous verrons par la suite. De plus, nous avons vu dans les chapitres précédents que malgré leurs différences, les chaînes logistiques ont de nombreux points communs avec les réseaux de production.

Nous allons tout d'abord présenter le principe de résolution puis nous discuterons de ses limites et de leurs conséquences pratiques.

3.2.2.a. Principe de la méthode

Pour expliquer simplement la méthode de résolution, nous allons considérer que nous étudions le système simple de la figure 4. Pour une explication plus complète, le lecteur pourra se référer à [BAY 01].

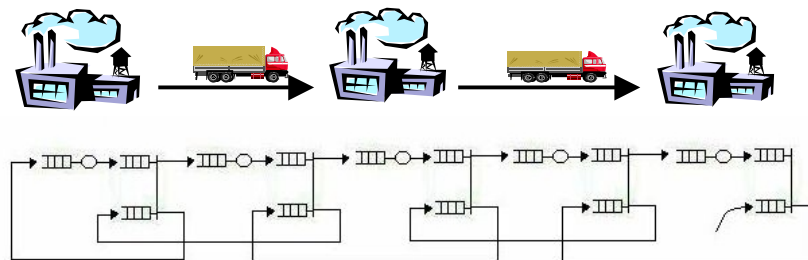


Figure 4 : Le système étudié

L'idée de la méthode est d'approximer les performances de ce réseau de files d'attente multiclassé par celles d'un ensemble de réseaux de files d'attente fermés, monoclasses et à forme produit dont les stations sont exponentielles à taux dépendant de l'état (i.e. du nombre de clients de la même famille déjà présents) comme illustré par la figure 5.

Chacun de ces réseaux de files d'attente est associé à l'une des classes du réseau de départ et donc à l'une des boucles kanbans, le lien entre eux étant l'arrivée de pièces brutes et

la demande externe. Nous analysons séparément chacun de ces réseaux (de type Gordon-Newell [GOR 67]) de manière exacte.

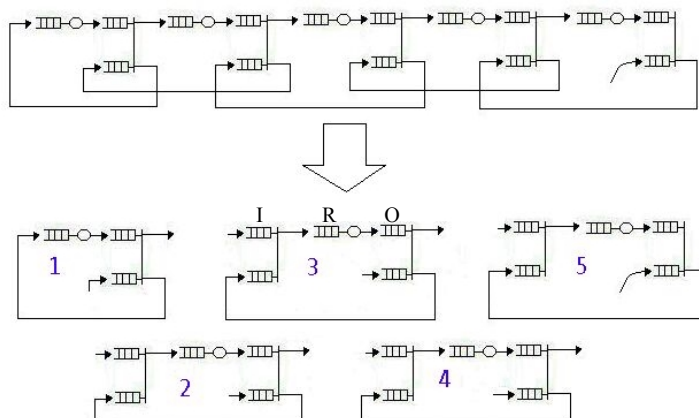


Figure5 : Décomposition en réseaux fermés monoclasses

Si nous appelons les stations, dans l'ordre, I, R et O (voir figure 5), l'état de ce système est défini par le nombre de pièces dans chaque file, soit donc le vecteur $\vec{n} = (n_I, n_R, n_O)$ avec $n_I + n_R + n_O = K$, le nombre total de kanbans. Il faut associer à ce vecteur les probabilités $p(n)$ liées aux différentes réalisations qu'il peut prendre. Comme le réseau est du type Gordon Newell, nous connaissons la formule liée à ces probabilités.

Seulement dans cette formule apparaît $\mu(n)$, le taux de service dépendant de l'état. Pour le calculer, on étudie chaque station en isolation. On obtient donc un système ouvert, avec un taux d'arrivée dépendant de l'état. Si l'on suppose que l'on connaît ce taux d'arrivée, on peut déterminer les probabilités stationnaires pour chaque quantité de clients dans la station avec la méthode qui convient : file $\lambda(n)/PH/1/N$ pour une file avec serveur ou méthode de Di Mascolo [DIM 93] pour une synchronisation. Cette valeur étant connue, nous pouvons déterminer le débit conditionnel (dépendant de l'état) du modèle ouvert avec une formule que nous appelons 1 pour la suite. Cette valeur est le flot moyen de clients sortant du système ouvert en fonction du nombre de clients présents. On prend donc comme taux de service pour la station du réseau équivalent fermé, le débit conditionnel du système ouvert (cela constitue la formule 2) et on peut alors résoudre ce système. La connaissance de ce système nous permet alors de déterminer les taux d'arrivée que nous avons précédemment supposés connus dans les systèmes ouverts avec une formule que nous notons 3.

On constate donc que la résolution se reboucle, c'est pourquoi la méthode est utilisée sous forme d'un algorithme itératif :

1. Initialiser les taux de service des stations du réseau équivalent fermé

2. Pour chaque système ouvert :
 - Calculer les taux d'arrivée avec la formule 3
 - Avec ces taux, analyser chaque système en isolation
 - En déduire les probabilités stationnaires
 - Calculer ensuite les débits conditionnels avec la formule 1
 - Affecter la valeur trouvée aux taux de service du réseau équivalent fermé par la formule 2
3. Recommencer le pas 2 jusqu'à convergence des valeurs des taux de service du réseau fermé
4. Calculer les performances de chaque classe de clients grâce aux réseaux fermés équivalents.

Nous allons maintenant voir les limites de cette méthode de résolution et leurs conséquences sur notre étude.

3.2.2.b. Hypothèses liées à l'utilisation de Palkan

Les systèmes étudiés avec Palkan doivent répondre à certains critères. Tout d'abord, le routage des pièces doit être probabiliste. Il y a toujours des pièces brutes à l'entrée du réseau et les demandes non satisfaites sont mises en attente. Toutes ces conditions ne sont pas très limitantes pour notre étude. De plus, les files sont à capacité infinie (mais l'encours est borné par le nombre de kanbans) et les kanbans ont un temps de retour nul. Dans notre application, cela revient à dire que l'information circule beaucoup plus rapidement que la matière dans une chaîne logistique, ce qui est assez réaliste. En fait, concernant l'étude que nous envisageons, la limite principale de cette résolution est de ne pas prendre en compte la taille des lots. En effet lors de la décomposition, il faut que les différents systèmes que nous obtenons soient homogènes et ne subissent pas de changement de taille de lots. Or, si nous reprenons le modèle de la figure 4 et que nous supposons que tous les postes traitent les pièces une à une, sauf les usines 3 et 4 qui ne les traitent que par lots de 4, nous obtenons le modèle de la figure 6 dans lequel plusieurs tailles de lots coexistent dans une même boucle kanban. On a donc des pièces qui circulent par lot de 1 au début et à la fin du réseau. Mais au niveau des postes 3 et 4, la taille des lots est de 4 (représentée par 4 pièces formant un carré). Or, cette taille des lots affecte également les demandes puisqu'à la synchronisation entre les postes 3 et 4, elles sont regroupées par quatre pour être homogènes avec le mode de production (représentées par une barre de 4 pièces collées). On constate donc que sur certains postes, on a des lots de taille non homogènes (1 en entrée et 4 en sortie par exemple). On

touche là un véritable problème car cela remet quasiment en cause l'intégralité du fonctionnement de la méthode par décomposition et qu'il est difficilement envisageable d'étudier un tel système d'un bloc.

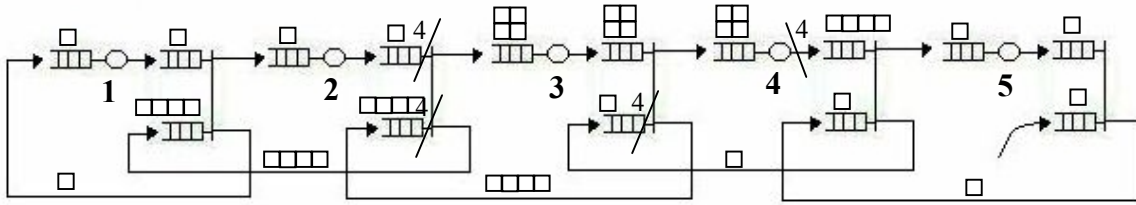


Figure 6 : Usinage des pièces par lots de 4

Ce problème est donc un axe de développement très intéressant car il permettrait d'étendre grandement les possibilités du logiciel. Cependant le temps nécessaire pour totalement développer une nouvelle méthode de résolution risque d'être assez important et nous avons donc choisi d'utiliser la méthode en l'état, bien qu'étant conscients de cette limite.

3.2.3. Modélisation par un réseau de files d'attente

Nous allons maintenant modéliser la chaîne logistique typique par un réseau de files d'attente. Le modèle que nous obtenons est présenté dans la figure 7.

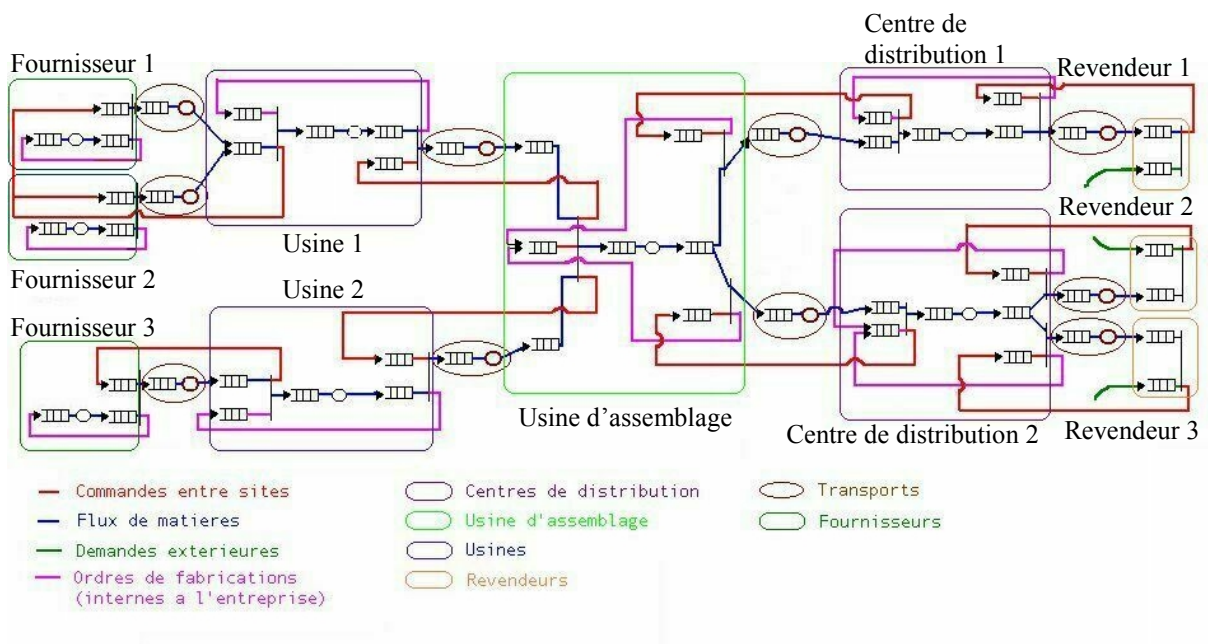


Figure 7 : Modélisation de la chaîne logistique par un réseau de files d'attente

Dans cette partie, nous allons voir comment représenter chaque élément (usines, transports, systèmes d'informations) grâce aux réseaux de files d'attente mais aussi quelles limites nous impose Palkan.

Nous avons obtenu la modélisation de la figure 7 en ne nous occupant pas des phénomènes internes. Pour nous, les pièces rentrent dans les sites, subissent une transformation et ressortent au bout d'un certain temps. Tous les sites sont donc modélisés de la manière suivante : un stock d'entrée, une partie opératrice avec une seule station et un stock de sortie. Il est également critique de savoir comment sont modélisées les pièces elles-mêmes dans le réseau. En effet, nous pouvons considérer que les entités circulant dans le réseau représentent chacune une pièce ou bien que chacune représente un lot. Toujours dans l'idée de rester assez global, nous allons opter pour la seconde solution. Le stock à l'entrée des sites se justifie donc car il peut y avoir des phénomènes de congestion entre des grandes séries de production. Nous pouvons cependant affiner la modélisation de la capacité de l'usine en adaptant le nombre de serveurs de la station. En effet, si l'on considère que le site peut traiter 3 lots en même temps, nous utilisons trois serveurs dans la station. Ainsi, si un lot arrive alors que trois sont déjà en cours de traitement, il faudra qu'il attende que l'un deux soit terminé pour pouvoir être traité à son tour. Evidemment, on peut supposer qu'on n'attendra pas réellement que la dernière pièce du lot précédent soit passée sur la dernière machine avant de commencer à traiter les premières pièces du lot suivant. Cependant, pour prendre ce genre de détail en compte, il faudrait détailler chaque site, ce qui alourdirait considérablement notre modèle alors que ce n'est pas notre objectif. Cependant, il est envisageable de modéliser précisément chaque atelier avec le nombre nécessaire de stations et c'est une possibilité offerte pour améliorer la qualité des études.

3.2.3.a. Modélisation des sites

Nous utilisons le fonctionnement suivant pour chaque site : Lorsqu'il reçoit des pièces, elles sont entreposées dans le stock d'entrée, s'il n'y a pas d'ordre de fabrication. Lorsqu'un ordre est lancé, les pièces sont traitées pendant une durée aléatoire pour laquelle on choisit une distribution de type phase⁷ puis elles sont entreposées dans le stock de sortie en attendant une demande du site aval. Néanmoins, quelques sites présentent des spécificités :

- L'usine d'assemblage : Elle assemble des produits provenant des usines 1 et 2. On peut imaginer que dans la réalité ces matières sont rangées dans le même espace

⁷ Combinaison de lois exponentielles qui permet d'approximer une loi générale [NEU 81] tout en gardant un caractère markovien bien utile dans les méthodes analytiques.

géographique. Cependant, les mécanismes de synchronisation que nous utilisons nous imposent de physiquement faire apparaître deux stocks différents en entrée de cette usine. Il y a donc deux stocks en entrée de l'usine d'assemblage, chacun recevant les pièces d'une des deux usines amont.

- Les fournisseurs : Les fournisseurs n'ont pas de stock d'entrée. En effet, on considère qu'ils possèdent de la matière brute en quantité infinie. Ils doivent tout de même lui faire subir des transformations avant de la transférer dans leur stock de sortie.
- Les centres de distribution : Le rôle de ce poste est de stocker les produits près des clients de manière à gagner en réactivité, de préparer les commandes en sélectionnant les bonnes références et en reconditionnant les produits qui arrivent généralement par lots importants et sont expédiés au client par petites quantités. Dans notre modèle, les centres de distribution sont modélisés comme les autres sites. Cette vision pourrait sûrement être améliorée en ne considérant pas seulement le temps de traitement qui représente la durée des transformations mais aussi le changement de la taille des lots entre le stock d'entrée et le stock de sortie. Nous pouvons modéliser ce principe avec les réseaux de files d'attente mais comme nous venons de le voir, Palkan impose que la taille des lots reste constante dans tout le réseau.
- Les revendeurs : Ils n'ont ni stock d'entrée, ni partie opérative. Ils seront simplement représentés par un stock dans lequel le client pourra se servir et une file représentant les demandes en attente des clients non servis.

Les différents sites étant modélisés, nous allons maintenant traiter le lien entre eux, c'est-à-dire les moyens de transport.

3.2.3.b. Modélisation des transports

Il existe plusieurs types de transports comme nous le verrons en détail au chapitre 4. Cependant, Palkan n'étant pas en mesure de tous les prendre en compte, nous utilisons une stratégie simplifiée dans notre modèle. Dans cette configuration, à chaque liaison entre sites est associé en permanence un moyen de transport, par exemple un camion, dont la capacité est d'un lot et qui effectue des aller-retours quand cela est nécessaire. Ainsi, lorsqu'un lot sort d'une usine pour être expédié au site aval, si le moyen de transport est disponible, il est immédiatement pris en charge et amené à ce site. Par contre, si le transport est déjà occupé, le lot est mis en attente sur le quai jusqu'au retour du camion. En termes de modélisation, on utilise donc une file d'attente avec un seul serveur.

La modélisation des différentes parties du réseau étant faite, nous allons maintenant nous intéresser à la manière de gérer tous ces sites.

3.2.3.c Gestion du réseau

Comme nous avons vu précédemment, nous avons décidé de gérer le modèle en flux tiré et d'appliquer une gestion par kanban au réseau. Mais le fait que nous utilisons le kanban sur un modèle aussi global, modifie quelque peu les notions qui lui sont associées en gestion de production. En effet, d'un point de vue physique, il n'y a pas ici d'étiquettes circulant entre les sites. Le kanban nous sert simplement à modéliser les demandes que se passent les sites entre eux. Le fonctionnement d'un site quelconque est illustré par la figure 8 :

1. Le site reçoit une demande du site aval.
2. Les lots correspondant sont expédiés à ce site aval.
3. On lance un ordre de fabrication pour remplacer les lots qu'on a enlevés du stock de sortie
4. On passe une commande au fournisseur pour remplacer les lots du stock d'entrée qui viennent d'être mis en production.

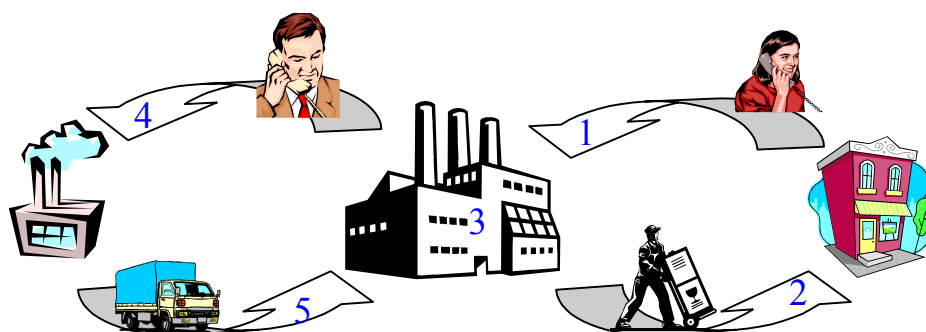


Figure 8 : Gestion de l'information entre les sites

Dans notre cas, la gestion par kanbans représente parfaitement le processus de remontée de la demande finale par échelons successifs, chaque usine ne considérant que son « client » et son « fournisseur ». De plus, même si les files d'attente ne sont pas à capacité finie, la gestion par kanbans limite l'encours et empêche que les valeurs des stocks n'atteignent des niveaux anormalement élevés.

L'utilisation de la gestion par kanbans entraîne l'utilisation de synchronisations entre la matière et les informations dans le modèle pour déclencher une fabrication lorsqu'une

demande arrive. Par exemple sur la figure 9, on peut observer la synchronisation des demandes et des 2 types de matières premières au niveau de l'usine d'assemblage.

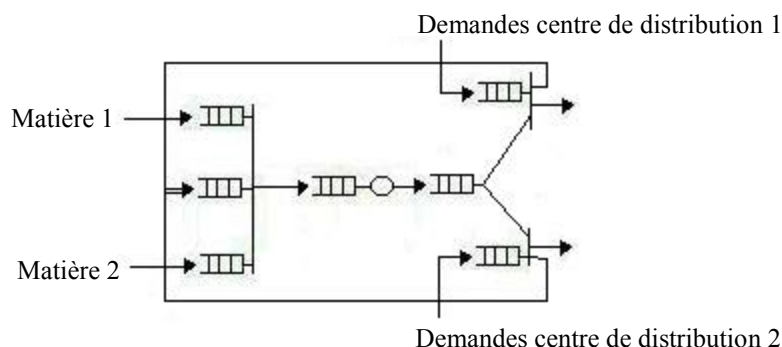


Figure 9 : Gestion de l'information au niveau de l'usine d'assemblage

Le cas de figure de l'usine d'assemblage est un peu plus complexe que les autres sites puisque les demandes viennent de deux centres de distribution différents. Pour choisir où expédier les produits finis, nous utilisons une politique privilégiant le centre de distribution qui a le plus de demandes en attentes.

Le modèle étant expliqué, nous allons passer à l'évaluation de ses performances.

3.3. Analyse de l'influence des paramètres du réseau

Nous allons maintenant procéder à une étude de l'influence des paramètres du réseau pour illustrer la manière dont les méthodes analytiques peuvent aider à analyser une chaîne logistique et apporter des informations nécessaires lors de sa création ou de sa modification, tout cela avec des temps de calculs extrêmement faibles. Conformément à l'analyse bibliographique que nous avons effectuée, nous allons utiliser comme indicateurs des performances du réseau typique le taux de service du client final, le niveau des différents stocks, le temps d'attente des clients, le temps passé dans le réseau par un produit et le coût du réseau (que nous allons expliciter par la suite). Ces indicateurs seront détaillés dans la partie suivante. De la même manière, les paramètres ont été choisis parmi les plus importants identifiés lors de l'étude de la littérature.

3.3.1. Description de la procédure d'analyse

Dans un premier temps, on attribue une durée faible aux postes d'approvisionnement et de reconditionnement et une durée plus élevée pour les temps de transport et de fabrication. Nous prenons donc un taux de service de 1 pour les fournisseurs et les centres de distribution et de 0.5 pour les usines et les transports. La capacité des usines est d'un lot traité à la fois. Le taux lié aux demandes doit être inférieur à ceux des sites, nous commençons avec des valeurs faibles comme 0.1 pour chaque client. Le coefficient de variation⁸ est choisi très élevé (égal à 1), ce qui est en accord avec la notion d'incertitude qui caractérise le contexte du système. On utilise 5 kanbans dans chaque boucle de manière à respecter la capacité de production du système (figure 10). Sur cette courbe nous observons qu'avec un nombre de 5 kanbans par boucle, nous pouvons au maximum faire face à une combinaison de demandes dont la somme des paramètres est de 0.38. Il est à noter pour la suite de l'étude qu'une valeur comme 3 kanbans par étage limite fortement la capacité (0.32) et peut donc être considérée comme une valeur faible alors que 11 kanbans par étage permettent déjà d'être presque à la capacité maximale du modèle. Ces trois seuils (3, 5 et 11) pourront donc être retenus par la suite comme valeurs représentatives de l'évolution du système.

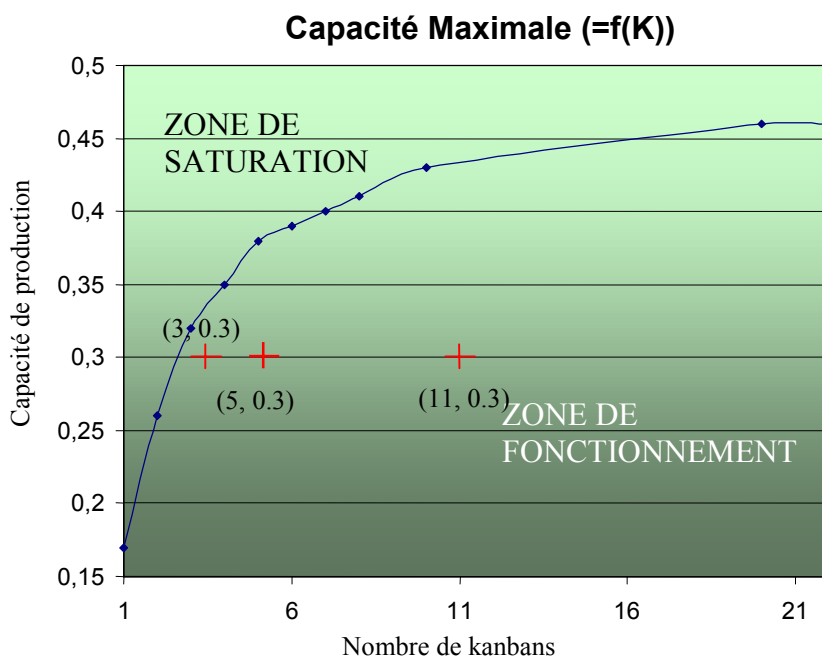


Figure 10 : Capacité de production du système en fonction du nombre de kanbans

⁸ Le rapport « écart type » sur « moyenne ».

3.3.2. Mise en œuvre de l'analyse

Dans un premier temps, on étudie de manière séparée l'impact des différents paramètres du réseau sur nos indicateurs de performance. Dans notre étude, le taux de service exprime le pourcentage de demandes qui sont immédiatement satisfaites. L'indicateur « coût global » est lui calculé en fonction du niveau des stocks d'entrée et de sortie des usines, de la qualité du service ainsi que de la durée des transports suivant la formule :

$$\text{Coût} = \sum_{\text{clients}} \alpha(1 - \text{taux de service}) + \sum_{\text{transports}} \beta(\text{temps de transport}) + a \sum_{\text{pièces brutes}} \text{niveau des stocks} \\ + b \sum_{\text{produits semi-finis}} \text{niveau des stocks} + c \sum_{\text{produits finis}} \text{niveau des stocks}$$

Pour la qualité du service, on pondère le pourcentage de demandes qui ne sont pas immédiatement satisfaites par un coefficient α . Les transports sont considérés à travers le temps mis par une pièce pour passer d'une usine à l'autre, modulé par un coefficient β qui reflète le coût du moyen utilisé (plus élevé pour l'avion que pour le camion par exemple). Enfin les coûts de stockage sont considérés en pondérant le niveau moyen des stocks par un coefficient qui reflète la valeur des différentes pièces (plus élevé en fin de réseau qu'en amont). De manière à obtenir un indicateur équilibré entre ces différents coûts, nous avons pris dans toute cette étude α égal à 300, β égal à 0.25 et nous avons pondéré le nombre de pièces brutes par 1, de produits semi finis par 2 et de produits finis par 4.

Nous allons maintenant commencer l'étude des variations successives de paramètres avec le nombre de kanbans.

3.3.2.a. Analyse des effets de la variation du nombre de kanbans

Dans cette partie, on étudie les effets d'une variation du nombre de kanbans en plusieurs endroits du réseau. La valeur initiale à tous les sites est de 5. Nous la faisons varier de 1 à 15 dans toutes les boucles, puis au niveau des revendeurs et enfin des fournisseurs. Nous observons tout d'abord les effets produits sur le taux de service. Les trois figures qui suivent montrent l'impact important de ces variations (figures 11, 12 et 13).

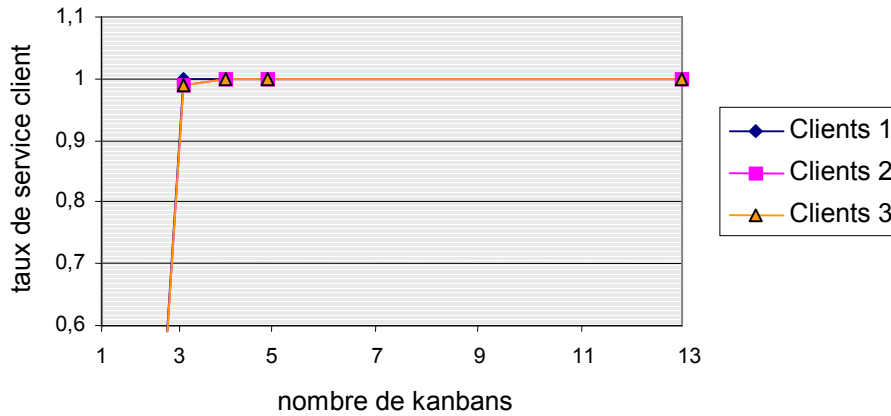


Figure 11 :Taux de service en fonction du nombre de kanbans dans chaque boucle

Comme nous pouvons le voir sur la figure 11, si l'on place moins de 3 kanbans par boucle, le réseau n'est plus en mesure de répondre aux demandes. Cependant dès la valeur de 4 kanbans, le taux de service est de 99% puis 100% pour toutes les valeurs supérieures. Nous faisons maintenant varier le nombre de kanbans en un seul endroit de la chaîne, les autres mailles conservant un nombre de kanbans de 5.

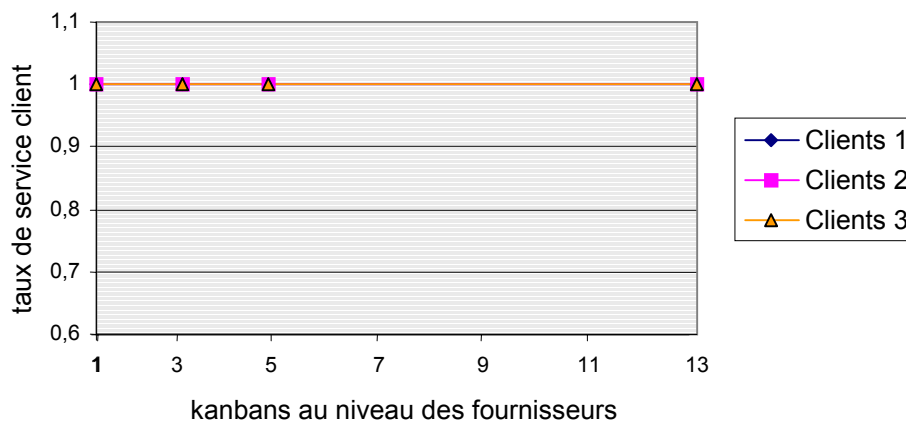


Figure 12 :Taux de service en fonction du nombre de kanbans fournisseurs

En fait, l'impact de la variation est assez local car nous venons de voir sur la figure 12 que si l'on fait varier le nombre de kanbans dans la partie la plus amont du réseau, le client, qui est le plus en aval, ne perçoit aucun signe de ces variations. Par contre, comme le montre la figure 13, si l'on fait la même manipulation très près du client, le taux de service est fortement affecté.

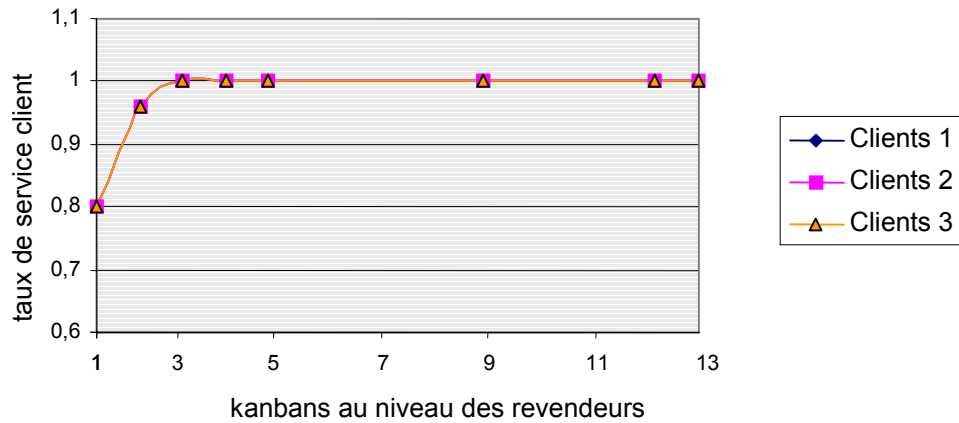


Figure 13 : Taux de service en fonction du nombre de kanbans revendeurs

Pour illustrer de manière plus claire cet aspect local des variations, nous reprenons le cas où la variation a lieu au niveau des fournisseurs. Nous visualisons dans les figures 14 et 15 les niveaux des stocks de sortie des fournisseurs puis des usines 1 et 2 qui sont directement en aval. On peut observer sur ces courbes que si les stocks des fournisseurs sont très affectés, ce qui est normal puisque c'est à ce niveau qu'on modifie le nombre de kanbans, l'influence sur les stocks des usines est quasi-nulle.

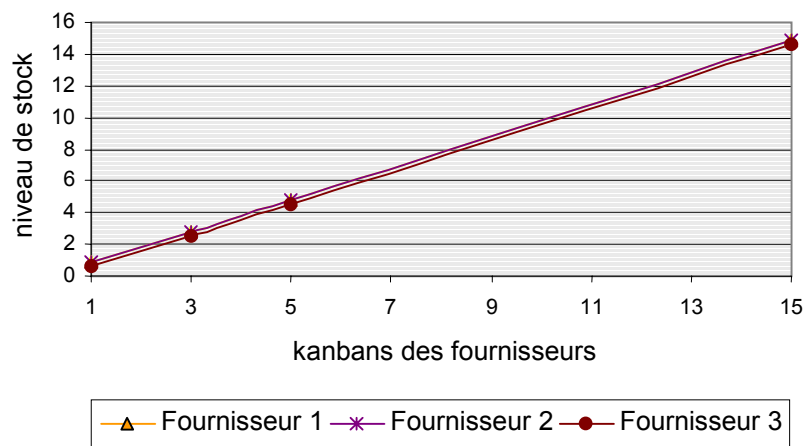


Figure 14 : Niveau de stocks des fournisseurs en fonction de leur nombre de kanbans

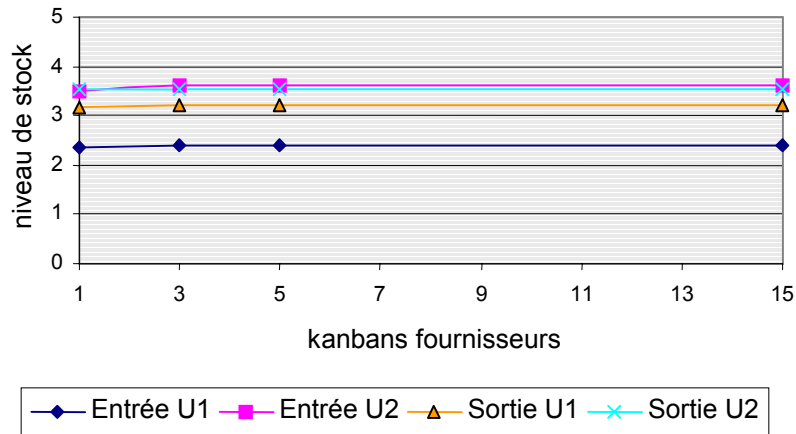


Figure 15 : Niveau de stock des usines en fonction du nombre de kanbans fournisseurs

Sur la figure 14, on obtient quasiment la droite $y = x$, ce qui montre le rapport très étroit entre le niveau des stocks d'un site et le nombre de kanbans dans la boucle associée. Par contre, sur la figure 15, on constate qu'à l'autre bout du réseau les effets sont à peine perceptibles. Même pour un nombre de kanbans de 1, ce qui est tout de même extrêmement faible, l'effet sur le niveau des stocks est compensé par la fréquence des transports.

Finalement, nous pouvons conclure que le nombre de kanbans est un paramètre très important puisqu'au niveau local il fixe quasi-directement le niveau des stocks.

3.3.2.b. Analyse des effets de la variation du taux de transport

Nous avons fait varier la vitesse des transports entre les fournisseurs et les usines 1 et 2 en agissant sur le taux de transport. Le taux associé aux transports étant à l'origine de 0.5, nous l'avons fait varier entre 0.36 (plus rapide) et 4 (plus lent) et nous avons observé les effets sur le niveau des stocks, le taux de service et le coût..

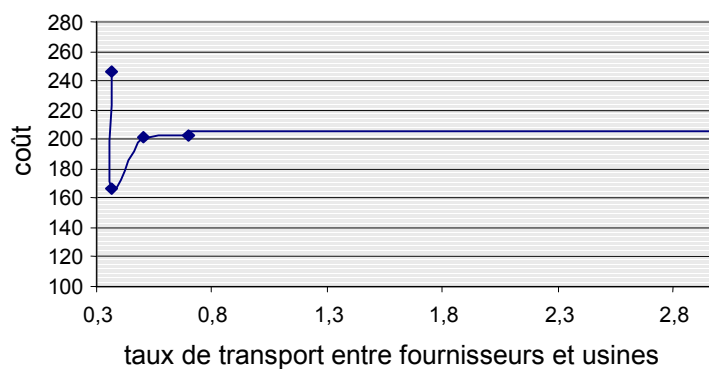


Figure 16 : Coût total en fonction du rythme des transports

Nous commentons les figures 16, 17, 18 et 19 de la droite vers la gauche. C'est-à-dire que les transports deviennent de plus en plus lents. Au début, lorsque les transports sont rapides, la fonction coût est constante. Cela est dû à la large contribution du niveau des stocks dans son calcul. En effet, tous les stocks sont à leur maximum et leurs valeurs restent donc constantes tant que les transports sont assez rapides.

Quand on commence à ralentir les transports, on peut observer sur la figure 17 que les stocks d'entrée des usines 1 et 2 commencent à diminuer mais cela n'affecte pas encore leur fonctionnement ni leur stock de sortie qui reste constant.

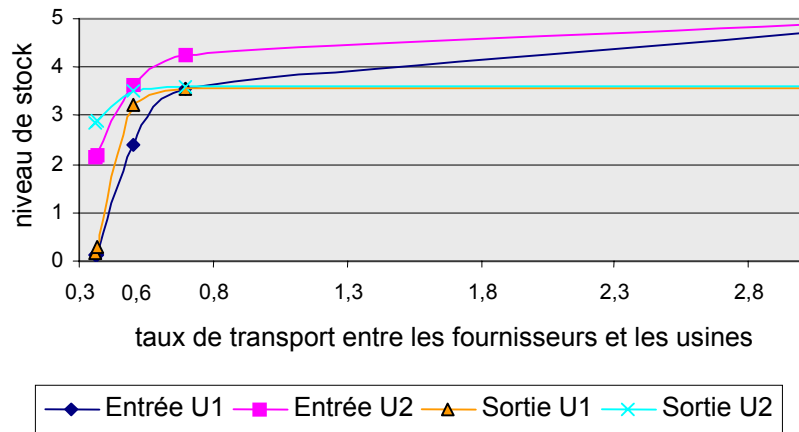


Figure 17 : Niveau de stocks des usines en fonction du rythme des transports

Lorsque le taux atteint 0.6, les usines commencent à être perturbées et leurs stocks de sortie diminuent. En dessous de 0.6, le désordre se propage aux autres niveaux du réseau comme les centres de distribution dont les stocks d'entrée diminuent (sur la figure 18).

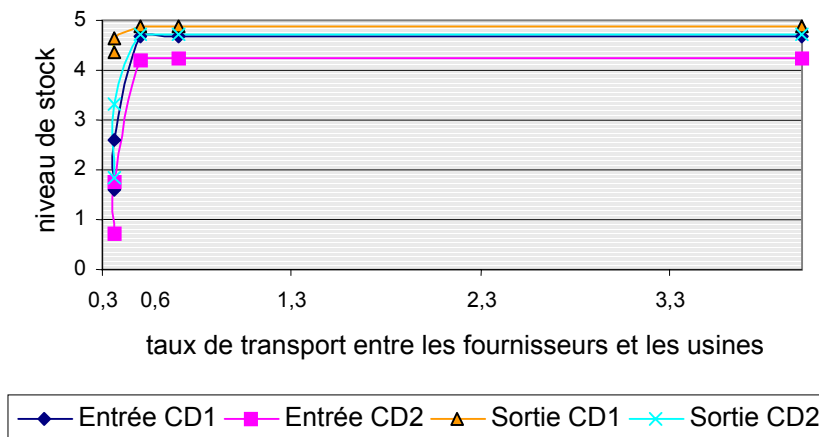


Figure 18 : Niveau des stocks des centres de distribution en fonction du transport

C'est ensuite au tour des stocks de sortie de diminuer et on assiste alors à une diminution du coût global puisque la plupart des niveaux de stock diminuent et que le taux de service est encore de 100%. Finalement, lorsque les transports deviennent trop lents, aux environs de 0.4, le taux de service est également dégradé et le coût global s'en ressent immédiatement du fait des pénalités.

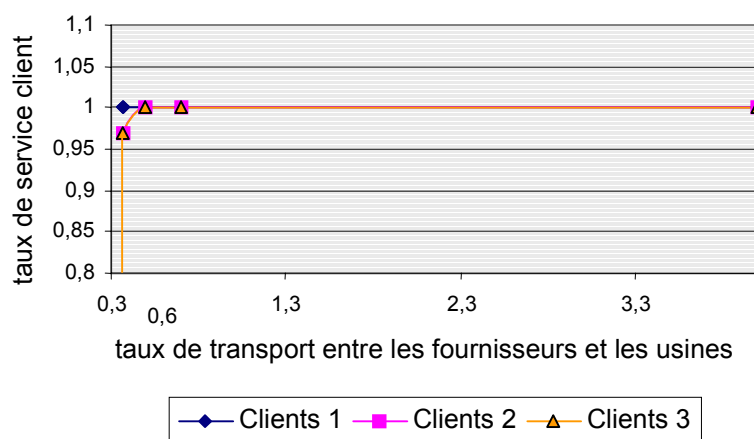


Figure 19 : Taux de service en fonction du rythme des transports

Nous avons réalisé la même expérience en modifiant cette fois les transports entre les centres de distribution et les revendeurs. Nous observons alors que toute la partie amont du réseau ne ressent absolument aucune modification. Cependant, le taux de transport reste d'importance puisqu'il affecte toute la partie aval du réseau et en particulier le taux de service du client final.

Nous avons également fait un essai en modifiant le taux de transport de toutes les liaisons du réseau. Dans ce cas là, la conjugaison des effets dus au ralentissement de chaque transport est tellement forte que l'on n'observe pas les phénomènes de décroissance progressive des stocks et de propagation du désordre. Passée une valeur seuil, toutes les liaisons deviennent simultanément trop lentes et le réseau est immédiatement submergé par les demandes et ne peut plus y faire face.

Nous avons également fait toute une campagne d'essais concernant le taux de production des usines mais les résultats sont exactement de la même nature. Si nous faisons, par exemple, varier le taux de production des usines 1 et 2, nous observons tout d'abord une diminution du niveau du stock de sortie de ces usines. Puis, par le même processus que précédemment, les sites en aval sont affectés à leur tour.

Toutes ces observations confirment bien les remarques déjà faites de nombreuses fois indiquant qu'une décision locale a souvent un effet global sur l'ensemble du réseau.

3.3.2.c. Analyse des effets de la variation du volume des demandes

Au début des expérimentations, le taux d'arrivée des demandes est fixé à 0.1 pour chaque type de clients. Dans cette partie, nous faisons varier le taux d'arrivée des demandes pour les clients de la zone 1 d'une valeur quasi-nulle (0.02) jusqu'à 0.18. Nous observons les effets produits sur le taux de service, le temps de séjour dans le réseau et les niveaux de stock.

Si nous commençons par observer la courbe 20, nous voyons que pour une demande très faible, le temps de séjour est très élevé.

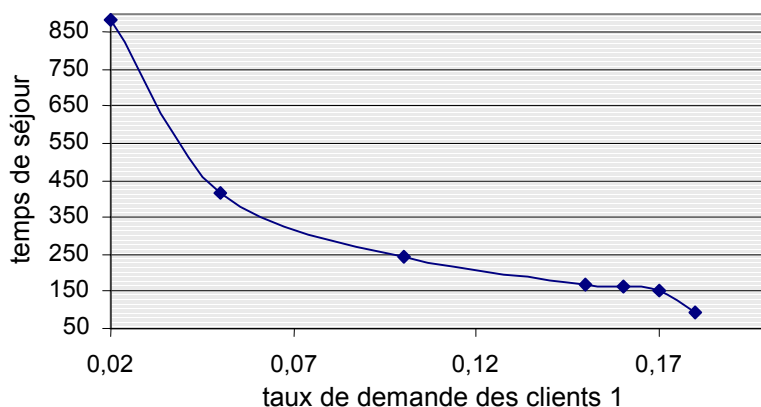


Figure 20 : Temps de séjour dans le réseau en fonction de la demande

Ce temps de séjour élevé est dû au fait que les produits passent énormément de temps en attente dans les stocks. La figure 21 montre d'ailleurs que les niveaux de stock des revendeurs sont à la valeur maximale. Le réseau est donc surdimensionné par rapport à la demande.

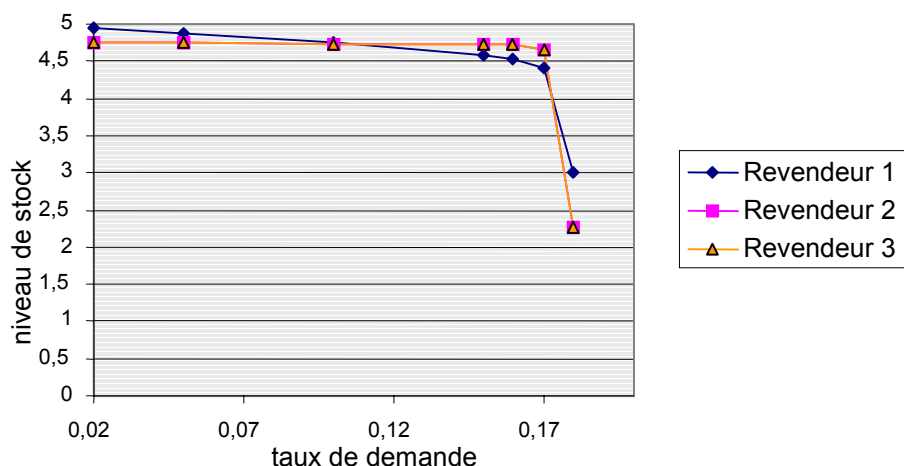


Figure 21 : Niveau de stock des revendeurs en fonction de la demande

Jusqu'à la valeur de 0.1 la situation est la même. Entre 0.1 et 0.16, le temps de séjour continue de décroître mais plus lentement. Dans cette partie, la capacité du réseau semble être plus adaptée à la demande. Les pièces ne passent plus autant de temps à attendre dans les stocks. On constate d'ailleurs une diminution des stocks des centres de distribution sur la figure 22.

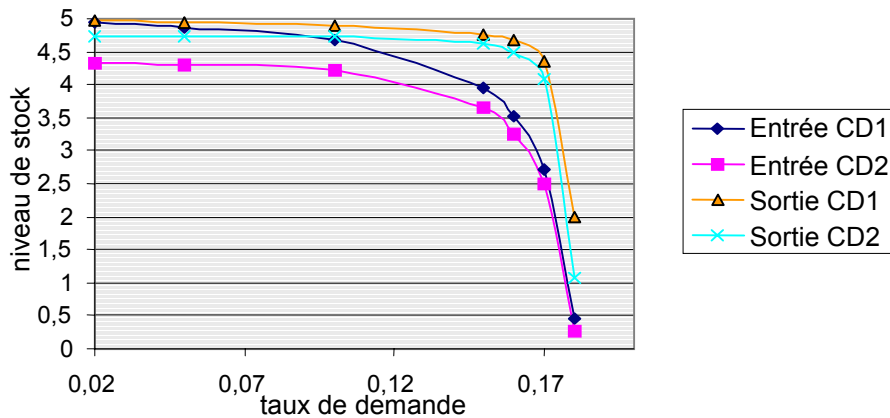


Figure 22 : Niveau de stock des centres de distribution en fonction de la demande

Comme le temps de traitement au niveau des centres de distribution est plus court que celui de l'usine d'assemblage, seul le stock d'entrée est impacté et les centres de distribution arrivent à garder des niveaux élevés pour leur stock de sortie. Cependant, lorsque le taux de demande devient supérieur à 0.17, l'usine d'assemblage n'arrive plus à produire pour tout le monde et son stock de sortie se vide. Ce phénomène affecte toute la partie distribution du réseau, comme le montrent les figures 21 et 22.

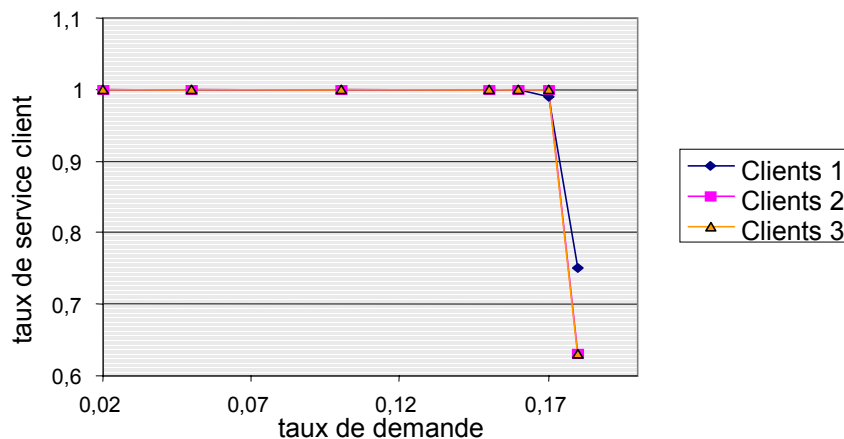


Figure 23 : Taux de service en fonction de la demande

Finalement le taux de service décroît, comme le montre la figure 23, et si le taux de demande du client 1 dépasse 0,18, le réseau n'est plus en état de faire face à ses demandes. Au passage, on peut constater que lorsque le taux de service est catastrophique on obtient le meilleur temps de séjour puisque les pièces circulent directement d'un site à l'autre sans séjourner dans les stocks. Nous pouvons donc comprendre l'importance de s'adapter à la demande car si le réseau est surdimensionné, les stocks sont toujours pleins, ce qui coûte cher et nous pénalise du point de vue réactivité, mais si notre capacité de production est insuffisante, la situation est ingérable.

Nous avons refait une série de tests en faisant varier cette fois la demande des clients de la zone 3. La différence avec le cas précédent est que les revendeurs pour les zones 2 et 3 s'approvisionnent tous deux au même centre de distribution contrairement au revendeur 1 qui est le seul client du centre de distribution 1. Nous avons utilisé une politique qui favorise le centre de distribution le plus chargé au niveau de l'usine d'assemblage. Malgré cela, on constate sur la figure 24 que lorsque le taux de service des clients 3 n'est déjà plus que de 40%, les clients de la zone 1 sont toujours servis à 100%. Notre politique au niveau de l'usine d'assemblage n'est donc pas suffisante pour compenser le fort déséquilibre des demandes. En effet, lorsque le taux de demande des clients 3 est de 0,18, le centre de distribution 2 doit fournir trois fois plus de pièces que le centre de distribution 1 avec la même capacité.

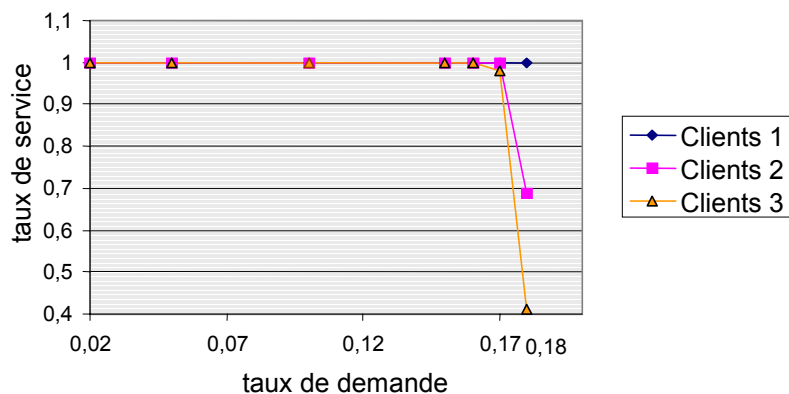


Figure 24 : Taux de service en fonction de la demande

Ce déséquilibre entre les deux centres de distribution explique d'ailleurs que les clients de la zone 2 soient également touchés par la chute du taux de service. De plus, si l'on revient au cas de la figure 23, lorsque la demande des clients de la zone 1 est augmentée, ce sont tout de même les clients des zones 2 et 3 qui ont le plus mauvais taux de service. En effet, la

somme des demandes des clients 2 et 3 est toujours supérieure aux demandes des clients de la zone 1. Les demandes issues du centre de distribution 2 sont donc prioritaires, avec un temps moyen d'attente de 13.48 unités de temps contre 29.6 pour le centre 1, mais cela ne suffit pas à annuler le déséquilibre.

Finalement nous voyons que la demande a une grande influence sur le fonctionnement du réseau. Le problème dans ce cas est que nous ne contrôlons pas la demande est que c'est le reste du réseau qu'il faut adapter en conséquence, d'où l'importance de son dimensionnement.

3.3.2.d. Analyse des effets d'une variation combinée des paramètres

Pour le dernier test, nous avons utilisé les mêmes paramètres que précédemment mais en les faisant tous varier en même temps. Nous avons affecté trois valeurs à chacun de nos quatre paramètres, ce qui nous donne 81 combinaisons différentes. Les quatre paramètres sont le nombre de kanbans dans toutes les boucles, le temps de transport dans toutes les liaisons, le taux de traitement au niveau de l'usine d'assemblage (car elle occupe un rôle central dans le réseau) et le taux d'arrivée des demandes 1, 2 et 3. Pour chacun de ces paramètres, la valeur initiale est prise comme référence. En s'appuyant sur les résultats des tests précédents et l'observation de l'effet des différents paramètres, nous avons déterminé une valeur forte et une valeur faible.

	-	=	+
Taux de traitement à l'usine d'assemblage	0.31	0.5	1
Taux de demande	0.22	0.3	0.38
Temps de transport	2.6	2	1
Nombre de kanbans	3	5	11

Tableau 12: Niveaux des paramètres

Nr	Transports	Kanbans	Traitement à l'U.A.	Demande
1	-	-	-	-
2	=	-	-	-
3	+	-	-	-
4	-	=	-	-
5	=	=	-	-
6	+	=	-	-
7	-	+	-	-
8	=	+	-	-
...

Tableau 13: Combinaisons des paramètres

Le passage de la valeur référence à la valeur forte de chaque paramètre signifie : une accélération des cadences pour l'usine d'assemblage, une augmentation du nombre de demandes des clients par unités de temps, un ralentissement des transports entre chaque site et une augmentation du nombre de kanbans.

Les tableaux 12 et 13 présentent les valeurs retenues et les combinaisons. Dans le tableau 13, on peut observer que le temps de transport change à chaque numéro de combinaison. Le nombre de kanbans change, lui, toutes les trois combinaisons, le temps de traitement à l'usine d'assemblage toutes les neuf combinaisons et les demandes toutes les 27.

Nous avons donc étudié les effets produits sur nos indicateurs de performance. Dans la figure 25, nous nous sommes tout d'abord intéressés aux taux de service client. Ces taux de service sont représentés de manière cumulée. Ainsi lorsque tous les taux de service sont de 100%, on obtient une valeur totale de 3. A l'opposé, lorsque le réseau n'est plus en état de faire face à la demande, nous lui avons attribué un taux de service de 0.

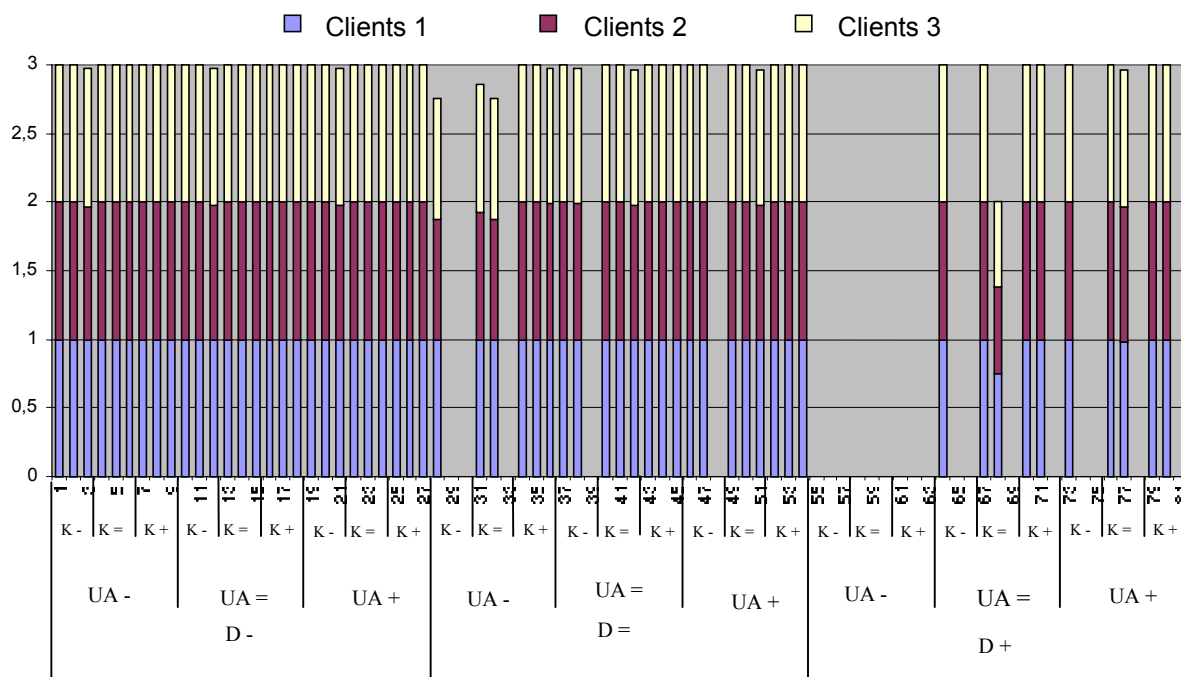


Figure 25 : Taux de service client en fonction des combinaisons

Nous pouvons observer plusieurs choses sur cette courbe. Tout d'abord, lorsque le nombre de kanbans est élevé, le taux de service est meilleur. Avec 3 kanbans le réseau est souvent saturé. Cela est illustré par les combinaisons 29, 30, 39, 48, 55, 56, 57, 65, 66, 74 et 75. Le réseau peut également être saturé malgré un nombre de kanbans élevé. Par exemple, les combinaisons 61, 62 et 63 provoquent un taux de service de 0 mais cela est dû à la combinaison de deux autres paramètres qui sont une demande maximale et une usine

d'assemblage lente. L'usine d'assemblage a donc également un impact visible sur cet indicateur. La demande a, elle, des effets très visibles puisque sur les 27 combinaisons où elle est forte (droite de la figure), on obtient 62% de saturations du réseau. Enfin, même le temps de transport produit un effet puisque sur les cas 79, 80 et 81, seul le 81, auquel est associé un temps de transport élevé, conduit à une rupture du service.

Le taux de service est donc un indicateur de performance particulièrement intéressant puisqu'il est sensible aux variations de tous les paramètres. Cette étude nous montre donc que lorsqu'ils sont combinés, tous les paramètres peuvent influencer sur les performances du réseau de manière critique. Nous avons également étudié les résultats sur le temps d'attente des clients mais cette étude n'apporte pas d'informations supplémentaires. Nous allons donc nous intéresser maintenant à la réactivité du réseau, c'est-à-dire au temps de séjour des pièces. Cet indicateur de performance est présenté à la figure 26.

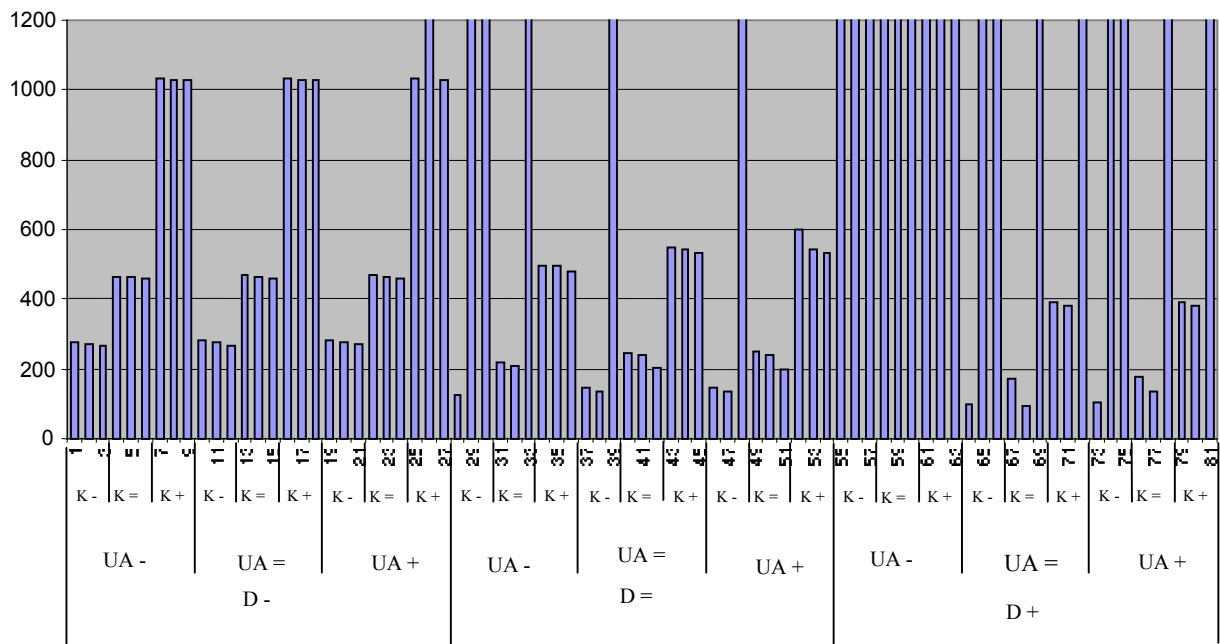


Figure 26 : Temps de séjour en fonction des combinaisons

Dans les cas de saturation du réseau par la demande, nous avons attribué une valeur très supérieure aux autres temps de séjour mesurés, soit donc 1200. La première chose que nous pouvons remarquer en regardant cette courbe, c'est que plus le nombre de kanbans augmente, plus le temps de séjour est élevé. Cela paraît logique puisque ces deux grandeurs ont un rapport étroit avec le niveau des stocks. D'un autre coté, on observe également que le réseau est plus souvent saturé avec un nombre de kanbans faible.

Comme nous l'avons vu dans les tests précédents, la demande est également fortement liée avec le temps de séjour. Ainsi on peut déduire des cas 13, 14 et 15 et 40, 41 et 42 que si la demande est plus forte, elle peut faire diminuer le temps de séjour. C'est ce qui explique la différence entre ces deux groupes de valeurs. Cependant, une fois de plus, la demande n'est pas un paramètre que l'on peut réguler et une demande trop forte pour le réseau conduit rapidement à un taux de service nul.

Les autres paramètres ont un impact moins évident sur cet indicateur de performances. Cela nous montre donc que le nombre de kanbans, c'est-à-dire le paramètre lié à la politique de gestion, est primordial. C'est déjà une constatation que nous avons faite au travers de l'étude bibliographique. De plus on retrouve une fois de plus le problème du dosage des niveaux de stocks, trop élevés c'est une perte d'argent et de réactivité, trop faibles c'est l'assurance d'un mauvais temps de service.

Nous avons étudié le coût du réseau qui est également très influencé par le nombre de kanbans. Enfin nous avons déterminé plusieurs niveaux de stocks à travers le réseau. Les observations étant concordantes pour tous, il n'y pas de grand intérêt à présenter tous les résultats en détail. Nous avons donc choisi arbitrairement de présenter les stocks des usines 1 et 2 en figure 27.

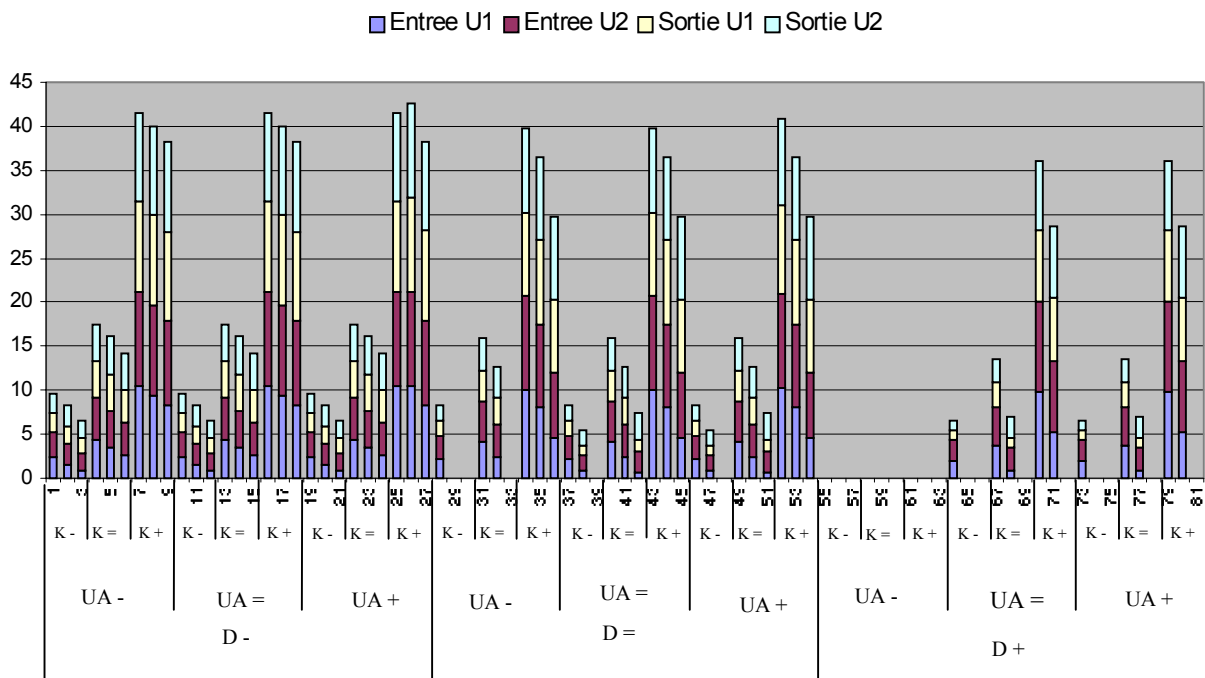


Figure 27 : Niveau de stock des usines en fonction des combinaisons

Les cas où le réseau est en saturation se sont vus attribuer la valeur 0 pour leur niveau de stock. Il est plus qu'évident en regardant cette courbe que le nombre de kanbans a un

impact certain sur le niveau des stocks. Le niveau des stocks augmente donc en même temps que le nombre de kanbans et on peut également observer qu'il diminue lorsque la demande augmente. Pour cela il suffit de comparer les combinaisons 13 à 15 aux 31 à 33 et aux 67 à 68. Ces trois échantillons correspondent respectivement à une demande faible, normale puis forte. On voit bien que le niveau des stocks diminue lorsque la demande augmente. La limite à ne pas dépasser étant illustrée par la combinaison 69 où le temps de transport est trop long et conduit à une rupture du service. On voit donc que le transport a aussi un effet sur les performances du réseau. Cependant son effet est plus réduit que les paramètres précédents.

L'effet produit par l'usine d'assemblage peut être mis en lumière par les cas 29 et 38. Sur ces deux cas, on voit que le fait de trop ralentir la cadence de l'usine conduit à la rupture. Enfin, un phénomène un peu curieux a attiré notre attention. Il semble que lorsque les transports deviennent plus rapides, le niveau des stocks augmente (cas 1, 2 et 3). En fait, nous nous sommes aperçus que seuls les stocks d'entrée augmentaient alors que les stocks de sortie restaient stables. L'explication vient du fait que lorsqu'une demande vient du site aval et que le transport n'est pas disponible, le lot correspondant est sorti du stock pour être mis en attente sur le quai et la valeur de ce stock n'est pas relevée. Si le transport est lent, ce lot attend sur le quai. Mais si le transport est rapide, le lot est vite transféré au stock d'entrée du site suivant, faisant ainsi monter son niveau moyen.

Finalement, même si le nombre de kanbans semble prépondérant, on constate bien que tous les paramètres ont un impact sur les performances globales du réseau.

3.3.3. Conclusions

Nous allons tirer nos conclusions en deux parties. Dans la première, nous rappellerons les principales observations tirées de ces petites expériences. Dans la seconde, nous confronterons nos résultats à ceux d'une autre étude concernant également les effets des paramètres.

L'objectif de cette étude était de montrer comment les méthodes analytiques peuvent apporter des informations nécessaires à la création ou la modification d'une chaîne logistique. Nous avons analysé les effets des différents paramètres du modèle typique de chaîne logistique. Chaque résolution effectuée par Palkan n'a nécessité que quelques secondes de calcul. D'une manière générale, chacun des paramètres que nous avons utilisés a une influence sur les performances du réseau. En effet, nous avons montré cet effet de manière individuelle en nous concentrant sur chaque paramètre mais nous avons également vu que

lorsque tous varient à la fois, leurs effets se combinent. La variation simultanée a fait ressortir l'influence du nombre de kanbans qui semble donc être le paramètre prépondérant. Dans cette partie de l'analyse nous avons appliqué des variations importantes au nombre de kanbans puisqu'elles concernaient toutes les boucles du réseau. Cependant, les transports qui ont également fait l'objet de variations importantes n'ont pas eu la même influence sur les performances du réseau. Il est également à noter qu'aucun des paramètres utilisés n'a été jugé insignifiant. Du point de vue des indicateurs de performance, chacun d'entre eux nous a été utile à un moment ou un autre de l'analyse. De plus, dans l'étude de combinaisons de paramètres, chacun de nos indicateurs de performances a été en mesure de faire ressortir les effets d'au moins deux de nos paramètres. Le niveau des stocks a montré qu'il subissait une grande influence de la part du nombre de kanbans mais c'est le taux de service qui nous a semblé être l'indicateur qui reflétait le mieux l'influence de chacun des paramètres.

Comme nous l'avons déjà signalé en introduction, Beamon et Chen ont également effectué une étude sur l'effet des paramètres et la pertinence des indicateurs de performance dans [BEA 01]. Le modèle qu'ils ont étudié est d'abord totalement convergent jusqu'à une usine puis totalement divergent, une structure que les auteurs nomment « conjointe ». Ce réseau est géré en flux tiré et les stocks suivent une politique de type (Q, R). La méthode utilisée est totalement différente de la notre puisqu'ils emploient des techniques de régression polynomiale quadratique et de simulation. Dans leur étude, ils cherchent à montrer l'influence du seuil de sécurité des stocks, de la variance du temps de traitement par le fournisseur, de la demande, du temps de transport et du temps de fabrication à l'usine centrale sur leurs indicateurs de performance. Ces indicateurs sont le niveau moyen de stock, le coût moyen de transport, le taux de service du client final, les ruptures internes ainsi que la flexibilité. Pour eux, les paramètres les plus importants sont le seuil de sécurité, la demande et le temps de transport. Ces résultats sont en parfait accord avec nos conclusions puisque nous avons également montré l'influence de la demande et du transport. De plus, le seuil de sécurité sert à dimensionner les stocks et à régler la politique de gestion, ce qui est le rôle du nombre de kanbans chez nous. Ainsi, même si techniquement les noms sont différents, nous avons tous les deux conclu que le paramètre lié à la politique de gestion du réseau était prépondérant. En ce qui concerne les indicateurs de performance, nous n'avons pas tout à fait les mêmes conclusions puisque les ruptures internes ne font pas partie de nos tests. Cependant, notre taux de service client mesure en fait les ruptures de stock au niveau des revendeurs. Il nous paraît donc logique que la mesure de ce taux de rupture à tous les niveaux du réseau soit un bon indicateur.

Finalement, en quelques mots, on peut noter que le nombre de kanban par boucle a une influence très grande sur le niveau des stocks de cette boucle. On peut également conclure qu'un dysfonctionnement au niveau d'un site ou d'une liaison entre sites peut provoquer une dégradation des performances de toute la partie du réseau située en aval. La demande quant à elle va tout d'abord avoir un impact sur le site dont la charge est la plus proche de sa capacité puis par extension sur toute la partie du réseau en aval de ce site. On peut également noter que les dysfonctionnements en amont du réseau ont plus de chance de ne pas être perçus par le client que des dysfonctionnement proches de ce dernier. Finalement, l'idée la plus forte est qu'une modification locale du réseau peut entraîner des conséquences pour la globalité de la chaîne logistique.

Les différentes remarques que nous avons pu faire concernant Palkan nous ont poussé à chercher des voies d'amélioration pour un développement futur de cette méthode, en particulier concernant les transports et la gestion du réseau. C'est ce que nous allons développer dans les chapitres 4 et 5,

3.4. Synthèse sur l'étude analytique du modèle

L'objectif de cette partie était de montrer comment les méthodes analytiques peuvent aider à analyser une chaîne logistique et apporter des informations nécessaires lors de la création d'un nouveau réseau ou de la modification d'un réseau déjà existant. Pour cela, nous avons étudié un modèle typique de réseau logistique et essayé d'analyser les effets de ses principaux paramètres. L'analyse que nous avons faite peut être considérée comme une extension à [ZIL 99b] puisque nous avons réalisé le même type d'étude mais sur un réseau plus représentatif d'une chaîne logistique. En effet, leur étude concernait seulement une chaîne linéaire. Nous avons donc utilisé les résultats de la partie précédente pour construire un modèle « typique » de chaîne logistique. Nous avons ensuite évalué les performances de ce modèle avec une méthode analytique développée au LAG et implémentée dans le logiciel Palkan. Pour choisir nos paramètres et indicateurs de performances, nous avons utilisé les données de l'étude bibliographique. Nous avons retenu le nombre de kanbans, le temps de transport, le temps de fabrication et la demande comme paramètres et nous avons observé les effets produits sur le taux de service, le niveau des stocks, le temps de séjour ou encore le coût du réseau. Nous avons présenté le principe de la méthode analytique implémentée dans le logiciel Palkan et discuté de ses limites, en particulier l'impossibilité de gérer la taille des lots. Nous avons conduit nos tests en deux phases. Tout d'abord des variations successives de

chaque paramètre puis des variations simultanées. Nos observations nous ont permis de dégager des principes utiles à la prise de décision stratégiques ou tactiques au moment de concevoir ou modifier une chaîne logistique. Par exemple, le nombre de kanbans par boucle a une influence primordiale sur le niveau des stocks de cette boucle. Un dysfonctionnement au niveau d'un site ou d'une liaison entre sites provoque une dégradation des performances de toute la partie du réseau située en aval. De plus, les dysfonctionnements en amont du réseau ont plus de chance de ne pas être perçus par le client que des dysfonctionnement proches de ce dernier. Enfin, une modification de la chaîne logistique de manière locale entraîne des conséquences pour la globalité du réseau.

Chapitre 4

Etude de l’impact d’une modélisation plus fine des transports

Dans ce chapitre, nous allons étudier l’impact d’une modélisation plus fine des transports. En effet, ce type d’amélioration peut représenter une perspective de développement intéressante pour la procédure de résolution analytique, mais il importe avant tout de vérifier que cela apporte une amélioration concrète.

Pour procéder, nous allons commencer par étudier les pratiques industrielles de transports en considérant l’importance économique de chaque mode ainsi que les différentes organisations. Une fois toutes ces organisations répertoriées, nous proposerons une modélisation pour chacune d’entre elles.

Nous testerons ensuite ces modélisations sur un exemple inspiré d’un cas réel. Cet exemple nous permettra de comparer cette modélisation fine avec celle que nous avons sous Palkan de manière à évaluer l’erreur engendrée par une modélisation simplifiée. Ces travaux ont fait l’objet d’une présentation à la 18^{ème} conférence de l’IAR [CHE 03b].

Ignoti nulla cupido...

4.1. Motivation de l'étude

Dans le chapitre 3, nous avons modélisé les transports de la manière la plus simple possible, en leur associant un délai représentant l'ensemble des activités liées à ce secteur. Pourtant, comme nous avons pu le voir lors de l'étude de paramètres, les transports peuvent avoir un impact important sur l'ensemble du réseau. Dans ce chapitre nous allons donc modéliser les transports d'une manière plus fine et comparer les modélisations. Nous pourrons ainsi émettre un avis sur le degré de précision qu'il convient d'adopter lors de l'étude d'une chaîne logistique et par conséquent sur l'intérêt de développer notre modèle en ce sens.

Pour cette étude, nous allons tout d'abord étudier les pratiques de transport dans l'industrie. Une fois ces pratiques recensées, nous les modéliserons de manière assez fine et nous utiliserons cette modélisation sur un exemple concret qui nous servira à comparer les deux niveaux de précision.

4.2. Analyse des pratiques industrielles de transport

Avant de détailler chaque mode de transport, nous allons nous intéresser à l'importance de chacun dans le monde du transport de marchandise. Nous les étudierons ensuite par ordre d'importance. Si l'on s'en réfère aux chiffres du commerce de la France avec les 14 autres membres de l'union européenne, on obtient le classement suivant : transports routiers, maritimes, par rail, fluvial et aérien comme le montre le tableau.

Mode à la frontière (française puis U.E.)	Union Européenne (15 pays)		Pays tiers	
	Introductions	Expéditions	Importations	Exportations
Route	85.0	76.4	10.7	8.9
Mer	34.9	36.0	138.9	39.6
Fer	10.5	14.4	1.1	1.5
Voies navigables	4.4	13.8	0.8	1.1
Air	0.1	0.1	0.3	0.4
Autres	6.3	6.4	24.8	2.3
Total	141.2	147	176.6	53.8

Tableau 14 : Commerce extérieur de la France par mode de transport en 2000 (en millions de tonnes). (Source : Ministère de l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer)

Le tableau 14 observe le moyen de transport utilisé par les matières pour passer les frontières. On considère celles de la France pour les échanges avec l'union européenne puis celles de l'union pour les échanges avec les autres pays. Les transports par conduite⁹ ne sont pas pris en compte dans cette étude, leur domaine étant très spécifique. Nous allons commencer l'étude par les transports routiers.

4.2.1. Secteur routier

4.2.1.a. Présentation du secteur

Le secteur routier est un secteur important. En trafic intérieur français pour 2001, la route était en augmentation et représentait 273.7 milliards de tonnes.kilomètres. En effet, pour étudier l'importance du moyen de transport sur le territoire français, on considère la masse transportée ainsi que la distance parcourue. Au niveau français, le transport routier se divise en deux catégories :

- Le transport pour compte propre (flotte personnelle)
- Et le transport pour autrui (sociétés de transport)

L'activité du transport pour compte propre est majoritairement liée (à 70%) aux produits agricoles et aux matériaux de construction alors que le transport pour autrui est lui majoritairement concerné par les produits manufacturés. Cela ne veut pas dire que ces secteurs d'activités n'utilisent que la route, les produits agricoles utilisant aussi massivement les voies maritimes.

4.2.1.b. Organisation des transports

Nous avons donc recherché des renseignements auprès de transporteurs routiers par l'intermédiaire de leur site Internet¹⁰ en étudiant les services qu'ils proposent.

Dans le cas du transport pour compte propre, on peut supposer que les camions sont présents au moment désiré et qu'ils sont donc chargés avant de partir vers le site de destination où ils sont déchargés. On a alors du transport direct. L'organisation est la plus simple possible. Dans ce cas précis d'ailleurs, un délai prenant en compte les temps de chargement, transport et déchargement suffit pour la modélisation

⁹ Oléoducs, gazoducs...

¹⁰ <http://www.legendre.fr> et <http://www.graveleau.com>

Nous considérons à partir de maintenant un transporteur prestataire de service (transport pour autrui). Quel que soit le service qu'il propose, il peut s'avérer économique pour lui de regrouper plusieurs chargements ayant la même destination. On planifie alors un groupage des lots. Dans la phase de planification, on étudie les transports susceptibles d'être regroupés et la distance qu'ils peuvent parcourir ensemble avant de devoir être dégroupés. L'intérêt est donc de réaliser des économies sur une partie du parcours total en n'utilisant qu'un seul camion. Pour le groupage des convois, il faut donc acheminer la cargaison vers un point de regroupement, les transférer dans un camion unique qui couvrira la plus grande distance avant le dégroupage au point d'arrivée. Comme nous le verrons dans la partie suivante, la difficulté dans la modélisation sera au niveau du groupage où il va falloir évaluer l'impact de la synchronisation entre les différents camions. Par contre le point de dégroupage ne pose aucun problème, la partie de la marchandise nous intéressant repartant dans un autre camion sans se soucier du reste de la cargaison.

Pour des transferts sur de grandes distances, il est parfois possible d'utiliser une ligne régulièrement desservie par un service de camions (transports vers l'Europe de l'est par exemple). La majeure partie du trajet est alors effectuée par cette ligne régulière. Comme pour le regroupement de convois, on transporte donc la marchandise jusqu'à un point de stockage où elle va attendre le départ. Le fait d'avoir une date fixe facilite la planification et une fois de plus, le fait de réduire le nombre de camions sur une grande partie de la distance est plus économique. La différence de modélisation avec le cas précédent est que, maintenant, le camion 2 va partir à une heure déterminée et immuable, ce qui devrait changer l'aspect de la synchronisation.

Les prestataires de service disposent généralement de capacités de stockage réparties sur le territoire. Ils peuvent donc proposer aux entreprises d'externaliser leurs stocks. Ils prennent alors leur gestion à leur compte et ce dans deux cas :

- A l'envoi : le transporteur vient régulièrement chercher des lots dans l'entreprise qu'il consolide au fil du temps et qu'il va ensuite expédier massivement.
- A la réception : lorsqu'on reçoit un lot important qu'on ne peut pas (ou ne veut pas) stocker soi-même, le transporteur utilise ses capacités de stockage pour morceler la livraison en plusieurs livraisons régulières de moindre importance.

Par rapport aux cas précédents, la différence vient donc de ces navettes entre l'usine et l'entrepôt du sous-traitant que doivent effectuer les camions. La SNCF propose également ce genre de service. La distance majeure est alors effectuée par train et les navettes par camion.

Maintenant que nous avons identifié ces 4 organisations du transport, nous allons passer aux transports maritimes. La modélisation de chaque mode de transport n'interviendra qu'après la fin de l'étude de ces différents modes dans la partie 4.3.

4.2.2. Secteur maritime

4.2.2.a. Organisation des transports

Le transport maritime est un autre mode de transport extrêmement important. L'activité des ports français concerne surtout le vrac liquide et essentiellement le pétrole comme le montre la figure 28.

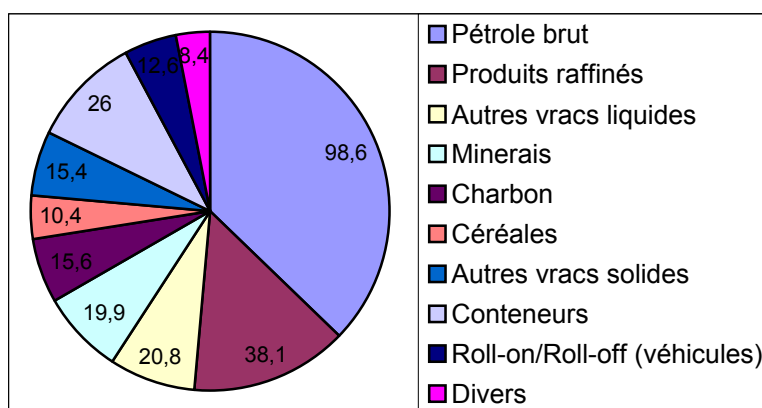


Figure 28 : Activité des 6 ports autonomes français (en millions de tonnes). Source : Ministère de l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer)

Comme on pouvait s'y attendre en voyant la répartition des marchandises, tout le secteur de l'énergie dépend fortement des transports maritimes (mais également du transport fluvial et par conduites). Bien que ne représentant qu'un faible pourcentage de marchandise, les céréales dépendent aussi très fortement de ce type de transport.

4.2.2.b. Organisation des transports

Une grande partie des informations de ce chapitre proviennent du ministère de l'équipement, des transports et du logement, direction du transport maritime des ports et du littoral ainsi que de l'offre de grandes compagnies maritimes comme P&O ou NYK¹¹.

¹¹ <http://www.mer.equipement.gouv.fr> et <http://www.nykline.com>

Le premier cas de figure est le « tramping ». Dans ce cas, les navires sont affrétés « au voyage » ou « à temps ». Ce mode d'organisation concerne principalement les secteurs du pétrole, du fer, du charbon et des céréales. On affrète donc un navire au moment voulu et il transporte la cargaison à un autre port. Nous retrouvons donc une configuration semblable à ce que nous avons vu pour le transport pour compte propre dans le cas des transferts par camions. L'organisation est très simple, le transport étant direct et sans contrainte particulière.

Le deuxième cas est l'utilisation d'une ligne régulière. Dans ce cas de figure les bateaux suivent un itinéraire prédéfini. Ils desservent donc certains ports précis et ce à des dates (ou avec une fréquence) fixes. Les lignes est/ouest reliant l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie/Pacifique sont les axes mondiaux les plus importants. Les industriels doivent donc réserver une place sur ces transports tout comme des voyageurs réserveraient une place dans un train. Nous retrouvons là encore une séquence semblable à ce que nous avons vu pour le transport par camions qui proposait lui aussi des lignes régulières. La particularité de ce cas est donc la synchronisation avec un transport partant à heure fixe. La combinaison de deux lignes régulières pour atteindre la destination s'appelle « l'interlining ».

Enfin, la dernière pratique que nous citerons est le « feederling ». Il s'agit de l'éclatement de la cargaison de gros navires qui ne desservent que très peu de ports entre plusieurs petits navires qui relient les ports principaux desservis par les grandes lignes aux ports secondaires. De même on a la pratique symétrique qui est le regroupement de plusieurs cargaisons dans un port central. Ces pratiques se caractérisent donc par des opérations de regroupement et de morcellement de la cargaison.

Nous allons maintenant étudier le troisième mode de transport, le rail.

4.2.3. Secteur ferroviaire

En trafic intérieur français pour 2001, le fer représente 50.3 milliards de tonnes.kilomètres mais l'évolution est à la baisse. Le transport par train concerne majoritairement (70%) les produits manufacturés, les produits agroalimentaires, la sidérurgie et les matériaux de construction. La majorité des informations de cette partie provient de la section fret de la SNCF¹². Une fois de plus, nous allons voir dans cette partie que les possibilités de transport offertes par le camion et le bateau peuvent se transposer dans le cas du train, à commencer par le transport direct entre sites.

¹² <http://www.sncf.com/fret/index.htm>

Le transport direct de la marchandise entre deux sites industriels nécessite que ces entreprises possèdent une gare sur leur site de production, c'est ce que l'on appelle une installation terminale embranchée (ITE). L'avantage du transport entre ITE est que l'on n'utilise qu'un seul mode de transport qui permet de transporter de grandes quantités en une seule fois sur de longues distances.

Les entreprises ne disposant pas toujours d'ITE, les transports sont souvent combinés et on effectue alors la majorité du trajet en train, les usines de départ et d'arrivée étant desservies par camions. On obtient donc un cas très similaire au regroupement de camion. La caractéristique de cette organisation est donc la synchronisation entre plusieurs chargements qui vont tous utiliser le même train sur la distance principale. Une extension de ce cas est le transport provoquant un regroupement en point nodal. Dans ce cas de figure, on regroupe les trains eux même en un seul grand convoi qui va effectuer la distance principale.

Certains axes européens très fréquentés ont donné lieu à un service de train régulier. On peut donc utiliser ces lignes en réservant une place à l'avance, les horaires du train étant connus. Pour accéder à ces trains il faut avoir au moins un wagon entier à faire transporter. Hormis cela, le fonctionnement est le même que pour des lignes régulières de bateaux.

L'étude des pratiques liées au rail étant terminée, nous allons maintenant nous intéresser à un de ses proches concurrents, le transport fluvial.

4.2.4. Secteur fluvial

En trafic intérieur français pour 2001, la navigation fluviale représente 6.7 milliards de tonnes.kilomètres et ce chiffre est en diminution. Le transport fluvial représente majoritairement (60%) les matériaux de construction et les produits agricoles. Les combustibles de centrales représentent quant à eux 17%. De part la géographie de la France, ce mode de transport est assez peu utilisé (seul 1 département français sur trois est dit « mouillé »). Cependant, ce mode est beaucoup plus important aux Pays Bas, en Allemagne ou encore en Belgique. Les données utilisées dans ce chapitre proviennent de plusieurs sources : l'agence hollandaise pour l'information sur la navigation intérieure (BVB), la compagnie fluviale des transports et le Port Autonome de Paris¹³.

Les transports directs sont assez rares puisqu'ils supposent que l'entreprise soit implantée au bord de l'eau, en particulier autour d'un port intérieur. On trouve cependant des exemples comme les centrales à bétons d'Ile de France qui sont construites le long des cours

d'eau navigables pour un transfert direct. Le fonctionnement est alors le même que pour le transport direct par bateau, train ou camion.

Le transport combiné est le plus répandu. En effet, le point de départ des barges est le plus souvent un port extérieur. Par exemple, beaucoup de produits ayant pour destination l'Île de France arrivent par bateau jusqu'à Rouen, où ils sont transférés et continuent leur trajet sur la Seine avant, généralement, de terminer leur voyage par camion. L'organisation typique peut donc être : transport maritime, puis fluvial, puis routier. Ce fonctionnement se classe dans la même famille que les regroupements de convois de camions, le *feeder* des navires ou encore le regroupement de train en points nodaux.

Tout comme nous l'avons vu avec les autres moyens de transport, on peut utiliser une ligne régulière pour transporter la marchandise. Un très grand nombre de lignes régulières relie par exemple Rotterdam (le plus grand port européen) au reste des Pays Bas ainsi qu'à l'Allemagne, la Belgique et même plus loin. Le fonctionnement est le même que pour l'utilisation d'une ligne régulière maritime.

Les principaux cas de transports ayant été envisagés nous allons rapidement étudier un dernier mode de transport : l'avion.

4.2.5. Secteur aérien

Pour cette partie, nous nous sommes renseignés auprès du service Cargo d'Air France¹⁴. Les transports aériens ne représentent pas un pourcentage important dans le transport des marchandises. Ils sont surtout utilisés pour des secteurs auxquels les autres modes ne sont pas adaptés. L'exemple le plus classique est l'envoi en urgence d'un produit manquant. Des services sont donc adaptés à ces conditions avec des délais très courts et des envois sans réservation préalable. Certaines entreprises pratiquant le flux tendu peuvent également avoir recours à l'avion qui offre alors des contrats avec des garanties sur les horaires. Les trains proposent d'ailleurs aussi ce genre de services en particulier pour le domaine automobile.

D'un point de vue organisation, les avions ne circulent évidemment que d'aéroport à aéroport, les liaisons avec les sites étant effectuées par camions. On est donc dans le cas d'un transport combiné avec une organisation comparable à celle d'un transport combiné par train.

Nous ne nous attarderons pas plus sur ce mode de transport et allons tirer un bilan de cette étude sur l'organisation des transports.

¹³ <http://www.inlandshipping.com>, <http://www.cft.fr> et <http://www.paris-ports.fr>

¹⁴ <http://www.airfrance.com/cargo>

4.2.6. Bilan et compléments d'information

Nous avons pu voir dans cette étude que chaque mode de transport ne peut s'étudier isolément des autres. En effet, lorsque l'on étudie un trajet réaliste de marchandise, on s'aperçoit que plusieurs moyens de transports sont utilisés au cours du trajet. Si certains modes peuvent être mis en concurrence (comme le fleuve, le rail ou la route), on assiste souvent à une collaboration entre les modes (mer, rail, route par exemple). Ainsi, 40% des transports par rails font suite à (ou se prolongent par) un transport maritime. En effet, la mer ne souffre pas de réelle concurrence sur les transports intercontinentaux, l'avion restant souvent réservé à des cas bien précis. De plus, les différentes formules proposées par l'un ou l'autre des transports peuvent se transposer à d'autres modes ce qui va limiter le nombre de cas à modéliser malgré la multitude de configurations envisageables dans le cas réel.

Les différences entre les transports se font donc plus par rapport à leur contraintes (la navigation implique d'avoir un cours d'eau à proximité par exemple), leur capacité de transport ou encore leur vitesse. En ce qui concerne les capacités, on a un rapport 10 entre chaque mode étudié lorsque l'on utilise l'EVP¹⁵ comme unité. Le tableau 15 montre les capacités des différents moyens de transport. On comprend bien l'avantage du bateau en regardant ce tableau, d'autant que comme nous allons le voir, sa grande capacité lui permet d'obtenir des prix très attractifs.

Mode de transport	Capacité de transport
Bateau	Milliers d'EVP
Barge	Centaines d'EVP
Train	Dizaines d'EVP
Camion	Une ou deux EVP

Tableau 15 : Capacités des différents modes de transport

En ce qui concerne les temps moyens de transports, il est difficile de donner une valeur absolue. En effet, la SNCF annonce une vitesse moyenne de 61km/h pour ses trains de fret mais cite certains exemples à plus de 120km/h. Du côté des camions, un transport sur autoroute peut se faire à plus de 100km/h alors qu'un trajet sur route nationale sera plus proche des 70km/h. Nous avons cependant retenu une valeur unique pour chaque transport comme le montre le tableau 16.

¹⁵ EVP : « Equivalent Vingt Pieds ». C'est une unité qui revient à comparer tous les volumes à un conteneur de 20 pieds de longs (environ 6m). Ce conteneur représente un volume de 30m³.

Mode de transport	Vitesse du transport
Camion	70 km/h
Train	60 km/h
Bateau	20 km/h
Barge	10 km/h

Tableau 16 : Vitesses des différents modes de transport

Mais le critère le plus important, et qui va généralement faire la différence, est le prix. Il est cependant difficile d'obtenir une comparaison empirique des différents prix car la variation entre les modes de transports n'est pas constante suivant la distance parcourue ou la masse transportée par exemple. Une comparaison ne peut donc se faire que sur des cas très précis. Toutefois, comme notre but n'est pas de nous restreindre à un seul cas, nous allons choisir un ordre de grandeur que nous pourrons ensuite utiliser en simulation. Pour cela nous allons utiliser des données en tonnes.kilomètres fournies par [SZP 96]. Ces données sont portées dans le tableau 17.

Mode de Transport	Prix par tonnes.kilomètres
Aérien	18
Routier	8
Ferroviaire	4
Fluvial	3
Maritime	0.8

Tableau 17 : Prix approximatif des modes de transport (en centimes d'euros)

Une fois de plus, ces valeurs ne doivent pas être considérées comme absolues. A titre d'exemple, le prix à la tonne.kilomètre par transport fluvial est compris entre 0.8 et 4.6 centimes d'euros ce qui montre la difficulté de retenir une seule valeur. De même, la valeur que nous avons retenue pour le transport routier est adaptée aux trajets supérieurs à 200 km. Pour des distances plus courtes, cette valeur peut passer du simple au double. C'est pourquoi plus que les valeurs numériques, on retiendra surtout le classement des différents transports ainsi que l'ordre de grandeur.

Enfin, d'autres différences peuvent être envisagées entre les transports comme les formalités administratives associées, la fiabilité des horaires qui est également très importante pour les industriels, le suivi de l'acheminement ou encore la gestion des passages de douanes.

De plus, les choix sont généralement facilités par des contraintes comme la distance qui peut être trop courte pour un mode (on fait rarement 20km en train) ou la nature du terrain qui peut également limiter les choix (on n'utilise pas de canaux dans une région sèche).

Les différents aspects des habitudes de transport ayant été vu, nous allons maintenant passer à la modélisation.

4.3. Modélisation des transports

De toutes les pratiques vues dans la partie précédente, nous pouvons retenir quelques caractéristiques majeures qui permettent de nous restreindre à 4 cas. Le transport direct, le regroupement de convois, la ligne régulière et l'externalisation des stocks. Nous allons essayer de modéliser le plus fidèlement possible chacune de ces configurations à l'aide de réseaux de Petri.

4.3.1. Transport direct

La caractéristique forte du transport direct est la simplicité. On charge un convoi, on transporte la marchandise et on la décharge. Ce mode de fonctionnement s'applique à tous les transferts directs, que ce soit pour des camions ou des barges, dans le cadre d'un transfert ferroviaire entre ITE ou du tramping. La modélisation est donc extrêmement simple comme le montre le réseau de Petri généralisé et temporisé de la figure 29.

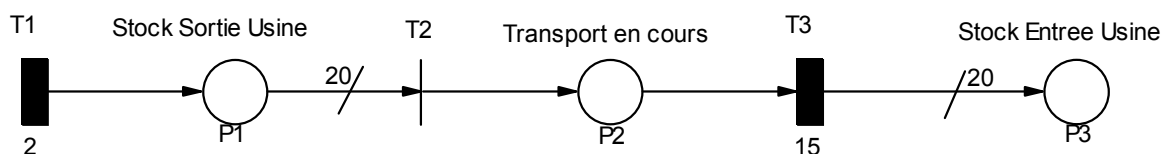


Figure 29 : Modélisation simple d'un transport direct

Sur ce schéma, on trouve des places notées P_i et des transitions notées T_i . Les transitions associées à un trait épais sont temporisées alors que les fines sont immédiates. Les durées que nous avons associées aux transitions temporisées sont purement indicatives et n'ont aucune justification physique. Les transitions et les places sont reliées par des arcs. Par défaut, ces arcs laissent passer les jetons un à un. Cependant, l'arc situé entre $P1$ et $T2$ indique que 20 jetons doivent être présents dans $P1$ pour que l'on puisse franchir $T2$. Au moment du

franchissement de T2, les 20 jetons sont regroupés en un seul qui est placé dans P2. Inversement au niveau de l'arc situé entre T3 et P3, lorsqu'un seul jeton franchit T3, 20 sont placés dans P3.

Dans cette modélisation on retrouve le stock de sortie de la première usine, le transport et le stock d'entrée de la deuxième usine. L'arc de sortie du premier stock est pondéré. Ainsi, lorsque le stock atteint une valeur donnée, on charge les jetons dans le transport et on modélise l'ensemble des temps opératoires (chargement, transport et déchargement) par un délai unique. Dans ce cas de figure, on considère qu'il n'y a jamais de problème de disponibilité du transport, soit parce que l'on possède une flotte personnelle assez importante, soit parce que la planification des événements fait qu'un camion sera toujours disponible au moment voulu en sortie d'usine.

Si cependant nous voulons tenir compte de la disponibilité du transport, nous pouvons utiliser le modèle de la figure 30.

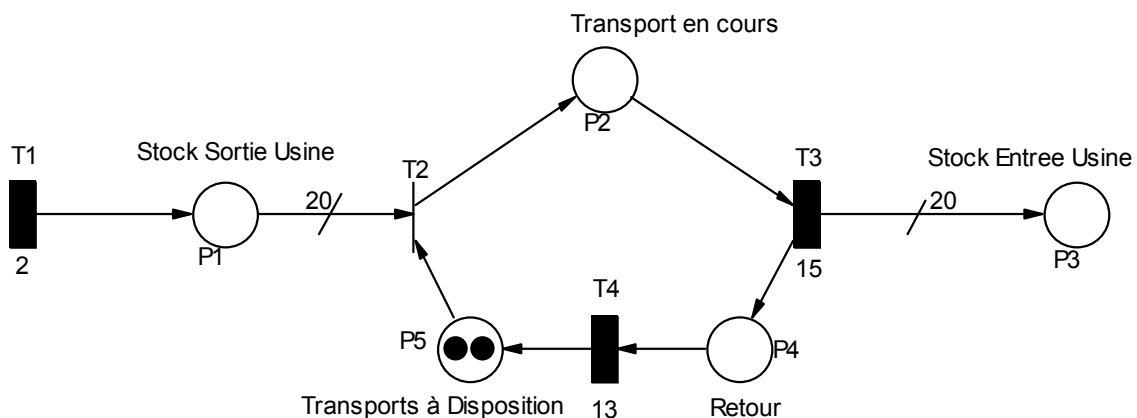


Figure 30 : Modélisation d'un transport direct prenant en compte la flotte de transport

Nous rajoutons la place P5 permettant de fixer le nombre de transports disponibles. Lorsque le transport commence, on prend la ressource qui n'est plus disponible tant que le transport n'est pas achevé. Ainsi, même si des jetons sont disponibles en nombre suffisant dans le stock de sortie de la première usine, ils doivent attendre que le transport précédent soit terminé. Nous pouvons donc déjà modéliser les problèmes de congestions causés par un éventuel manque de transport mais d'un point de vue formel nous avons considéré que le temps de retour était nul, ce qui est physiquement peu exact. Pour remédier à cela, nous pouvons rajouter la place P4 et une transition supplémentaires (T4), permettant de modéliser le retour du transport (avec une durée que l'on veillera à choisir inférieure au temps aller

puisque'il n'y a plus d'opérations de manutention de la marchandise). Sur ce modèle, les instants de la livraison à la deuxième usine et du retour du transport à la première sont donc bien différenciés.

Ces modélisations peuvent donc s'appliquer aux transports par route, rail ou mer mais avec bien entendu des valeurs de lots et de temps opératoire très différents d'un mode de transport à l'autre.

4.3.2. Transport avec regroupement

Nous avons vu au long des parties précédentes que, principalement pour des raisons financières, les transporteurs regroupaient souvent des transports en un seul pour la plus grande partie du trajet possible. C'est le cas pour des petites charges qui se regroupent dans un seul camion, les transports combinés rail/route ou canal/route ainsi que les regroupements de trains en points nodaux. La question ici est donc de voir l'impact de ces opérations de regroupement et morcellement. Pour le morcellement, la réponse est facile puisque chaque transport part dans sa direction sans se soucier des autres, il n'y a donc aucun impact sur le transport qui nous concerne. La seule difficulté est donc au niveau du regroupement.

Une première manière de voir (et donc de modéliser les choses) est de dire que la synchronisation étant une tâche planifiée, les différents transports sont censés arriver au bon moment au regroupement. Par conséquent, la perturbation qu'ils vont engendrer est faible et peut être prise en compte dans le temps de transport du trajet en y associant une variabilité plus élevée. D'un point de vue structurel, on obtient le réseau de Petri de la figure 31.

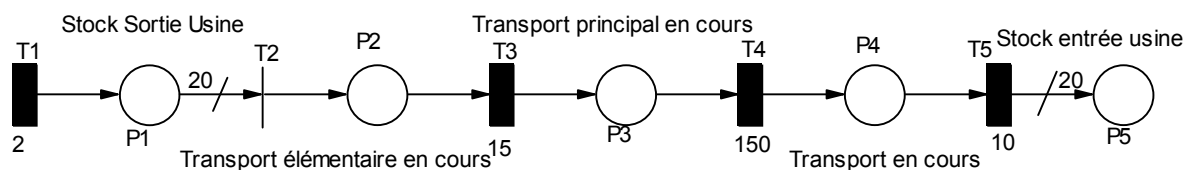


Figure 31 : Regroupement économique de transports

Dans cette représentation, nous avons choisi d'adopter la solution de la figure 29 (disponibilité permanente des moyens de transport) pour modéliser les liaisons avec les usines. Le transport principal est représenté par un simple délai qu'il est logique de prendre nettement supérieur aux deux autres puisque'on considère que ce regroupement est effectué pour parcourir la distance principale. De plus, ce délai prend en compte les temps de

manutention et de transport et l'incertitude qui lui est associée (sa variance) prend en compte les éventuels défauts dus à la synchronisation des différents transports. Il faut également noter que les vitesses et les coûts de transport sont différents sur les trois parties du trajet. Le fait que le transport principal ait une capacité supérieure aux deux autres n'introduit bien entendu aucune modification dans le modèle.

La deuxième manière de voir les choses est de considérer que la synchronisation entre les différents transports va forcément engendrer un temps d'attente, que l'on peut approximativement quantifier et qui devra refléter l'incertitude due à l'arrivée de convois dont nous ne connaissons rien. On peut donc modéliser le regroupement par le réseau de Petri de la figure 32.

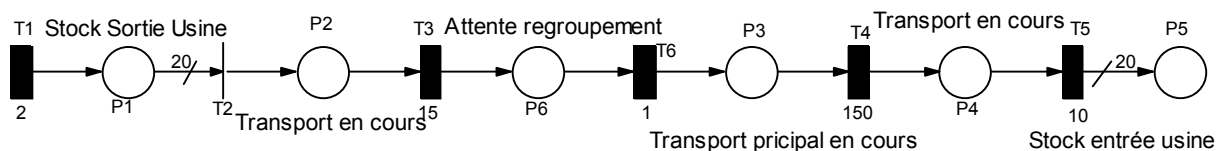


Figure 32 : Modélisation de la synchronisation

Si nous comparons avec la figure 31, nous avons rajouté la place P6 et la transition T6 avec un léger temps d'attente. Cette durée est affectée d'une variance suffisamment élevée pour symboliser l'aléa dû à la synchronisation avec d'autres transports que nous ne contrôlons pas. La suite du modèle reste inchangée.

4.3.3. Transport par une ligne régulière

Les regroupements que nous avons vus précédemment peuvent donner lieu à un transport dédié mais ils peuvent aussi être effectués sur une ligne régulière. D'un point de vue modélisation, le fait de regrouper plusieurs chargements est alors effacé par la synchronisation avec un transport partant à une heure (ou avec une cadence) fixe. C'est donc ce transport à heure fixe qui devient l'élément caractéristique du modèle et peu importe alors que l'on effectue un regroupement ou pas. Ce cas peut donc s'appliquer à l'utilisation de lignes régulières de camions, de bateaux, de trains ou de barges ainsi qu'au feederling et à l'interlining. Le réseau de Petri de la figure 33 représente ce cas.

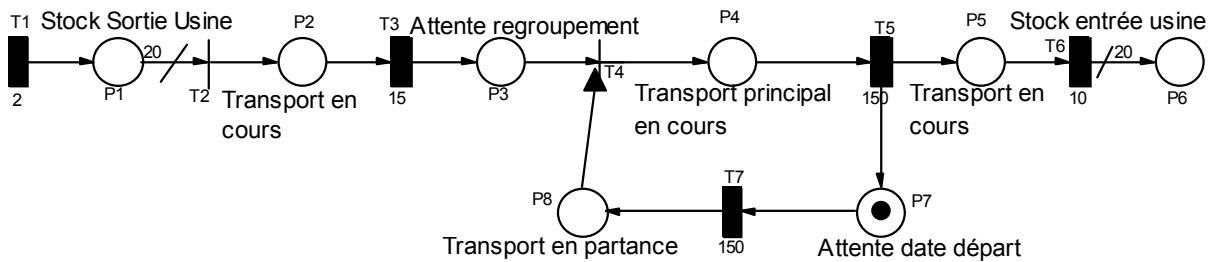


Figure 33 : Utilisation d'une ligne régulière

Si nous savons que nous envoyons des jetons à chaque passage de la ligne régulière, la seule chose à modéliser est le temps que nous allons attendre à chaque synchronisation. Dans ce cas, on reprend la modélisation de la figure 32 en remplaçant le délai associé à la synchronisation par une vraie synchronisation (T4) avec la place P8 qui est régulièrement validée (lorsque la date de départ est atteinte). Le transfert peut alors avoir lieu et lorsqu'il est terminé, la transition temporisée T7 simule le délai jusqu'au départ suivant.

Cependant, nous pouvons aussi considérer que la liaison régulière est trop fréquente pour notre production et que nous ne l'utilisons pas à chaque occurrence. Dans ce cas là certains transports auront lieu à vide (du moins sans notre marchandise). Pour modéliser ces transports à vide, nous utilisons la représentation de la figure 34.

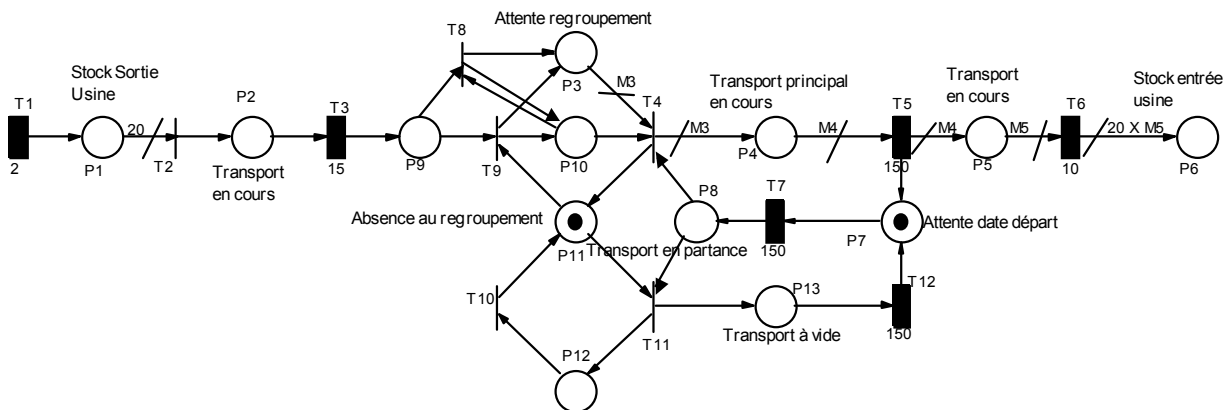


Figure 34 : Modélisation du transport simultané de plusieurs lots.

Nous ajoutons une dérivation identique au trajet normalement suivi lorsque l'on transporte des jetons sauf que justement, dans cette partie, on ne les transporte pas (P13, T11 et T12). Mais le fait de rajouter ce deuxième itinéraire provoque un conflit au niveau de la place P8 puisque le jeton peut alors partir suivant deux arcs différents. Si aucun jeton n'attend au regroupement il n'y a pas de problème mais si des jetons sont présents, les transitions T4 et T11 sont simultanément franchissables. Pour éviter ce conflit, on ajoute la place P11 (et T10 et P12) nécessaire pour valider T11 mais également reliée à T3. Ainsi, lorsqu'un jeton est mis

en attente il retire le jeton affecté à P11 et ne le rend qu'en franchissant T4. Le conflit est ainsi réglé mais un nouveau problème apparaît puisque la transition symbolisant le premier temps de parcours (T3) se retrouve conditionnée à P11 qui, elle, est partagée. Pour éviter tout problème, nous rajoutons la place en P9 et la transition T9 de manière à ce que le transport ne soit pas perturbé et que la synchronisation avec la place P11 n'intervienne qu'ensuite. Enfin, tout comme nous avons pris en compte l'éventualité que le transport soit trop fréquent pour notre production, nous pouvons également imaginer qu'il soit plus lent que notre rythme de production et que nous puissions donc envoyer plus d'un transport dans la même ligne régulière (qui par définition a une capacité nettement plus importante que nos transports locaux). Pour modéliser cela, nous faisons en sorte que lorsque le transport régulier passe, il emporte toute la marchandise qui était en attente, quelle que soit la quantité. Pour cela on pondère les arcs entre P3 et P6 en fonction du nombre de jetons en attente. La pondération des arcs nous permet donc de modéliser le transport d'une quantité variable avec le rythme de production mais elle fait également apparaître un nouveau problème. En effet, le jeton témoin placé en P11 est pris lorsque des jetons arrivent au regroupement et n'est rendu que lorsque ces jetons sont chargés et partent avec la ligne régulière. Or ce jeton est nécessaire à chaque fois que l'on veut passer dans la place P3. Maintenant que plusieurs jetons sont susceptibles d'aller en même temps dans cette place, il faut trouver un autre moyen pour leur autoriser le passage. Pour cela, lorsque le premier jeton entre dans la place P3, il enlève le jeton de P11 ainsi le transport comprend bien que des jetons sont présents et qu'il ne doit pas faire de voyage à vide. Mais elle transmet alors ce jeton dans la place P10 qui va servir de témoin et qui va conditionner le passage des jetons suivants par la transition T8. Cette place n'étant qu'un test, elle reprend immédiatement le jeton qu'elle donne lorsqu'elle autorise le passage des jetons (le lien est dessiné avec une double flèche sur la figure). Enfin lorsque les jetons sont chargés dans la ligne régulière (P4), on enlève le jeton de la place test pour le remettre dans P11. Un nouveau cycle peut recommencer.

Pour conclure, notons qu'en utilisant cette modélisation deux fois consécutivement, on modélise l'interlining.

4.3.4. Externalisation du stock

Pour finir, nous avons également vu que les prestataires de service proposaient une externalisation du stock que ce soit à l'envoi où ils effectuent une consolidation ou à la réception où ils effectuent du dégroupage et livrent l'entreprise à intervalles réguliers.

4.3.4.a. Consolidation

Dans ce premier cas, on suppose que l'entreprise envoie sa production à un centre de stockage qui pourra par la suite effectuer un transfert lorsqu'une quantité économique sera atteinte. On peut donc modéliser ce phénomène de manière assez simple avec le réseau de Petri de la figure 35.

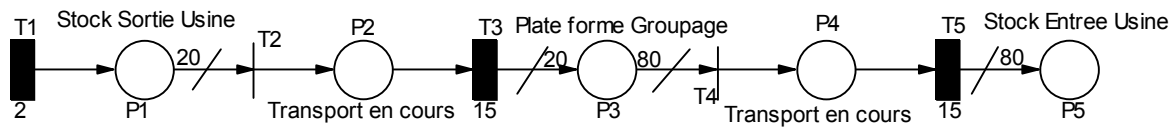


Figure 35 : Consolidation des lots

Dans cette représentation, nous avons repris la modélisation de la figure 29 pour les transports élémentaires (transports toujours disponibles). Ensuite, nous nous sommes basés sur les seuils des stocks pour déclencher les transports. On pourrait aussi utiliser un transport à horaires réguliers en remplaçant le début du réseau par celui de la figure 34.

4.2.4.b. Dégroupage

Pour le dégroupage, un stock important est donc reçu à la plate forme logistique. Elle ne va pas le transférer d'un bloc mais approvisionner régulièrement l'entreprise. La figure 36 illustre ce cas de figure.

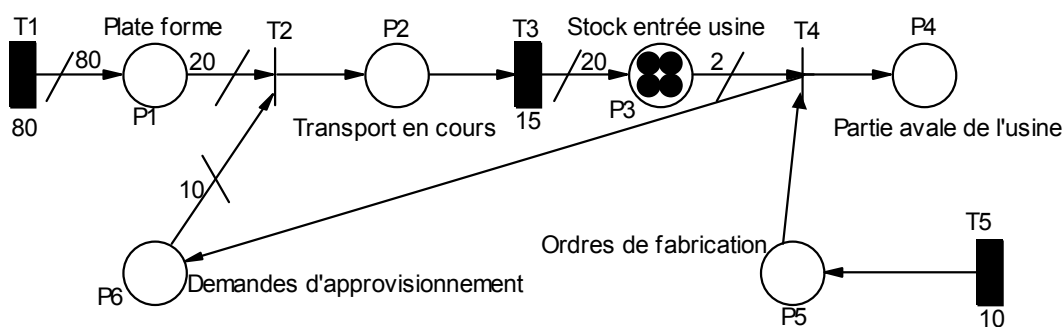


Figure 36 : Dégroupage de lots

L'usine possède son propre stock d'entrée P3 dans lequel sont prélevés les jetons deux par deux via T4 à chaque ordre de fabrication. Lorsque le niveau du stock d'entrée devient trop faible (ce qui se traduit par 10 jetons dans P6), ce stock est approvisionné depuis la plate forme P1. Un des avantages est donc de conserver des niveaux de stock bas au sein de

l'entreprise. Un autre avantage est que le temps de transfert depuis la plate forme est logiquement bien inférieur au trajet depuis le fournisseur. Le délai T3 est donc très faible à partir du moment où l'ordre de reconstitution est passé.

Maintenant que nous avons vu comment modéliser ces pratiques, nous allons illustrer tout cela à travers un exemple.

4.4. Evaluation de l'intérêt d'une modélisation fine : Etude de cas

Dans cet exemple, nous reprenons le cas d'une étude déjà menée au LAG dans [DIM 95] concernant une usine de Siemens située à Karlsruhe et une autre située à Erlangen. Dans la réalité, un train effectue une navette hebdomadaire entre les deux sites pour approvisionner l'usine d'Erlangen. Le modèle qui a été étudié avec Palkan dans cette étude est présenté en figure 37.

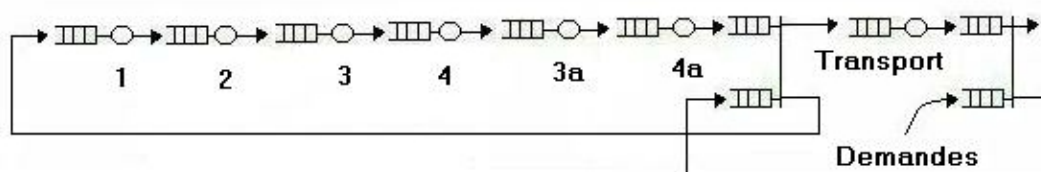


Figure 37 : Modélisation de la liaison entre Karlsruhe et Erlangen (Source : [DIM 95])

Les auteurs ont étudié la liaison par camions avec trois localisations différentes pour les sites, ce qui se traduit par trois distances entre eux : 280, 140 et 10 km. A ces distances sont respectivement associés des temps de transfert de 8h30, 4h15 et 1h20. Ils ont étudié les effets de ces changements sur le niveau de chargement des transports, le nombre de pièces en attente du transport et les demandes en attente. Leurs conclusions sont qu'une diminution de moitié de la distance (passage de 280 à 140 km) a un fort impact sur le nombre de demandes satisfaites, les niveaux d'encours et les pièces en attente d'un transport alors que des réductions supplémentaires de la distance n'ont ensuite qu'un effet plus limité.

Nous allons reprendre les bases de cette étude pour comparer les différents modes de transports possibles entre les deux sites et voir lequel est le meilleur. Nous envisagerons par la suite une délocalisation du site de Karlsruhe de manière à étudier un éventuel impact bénéfique. Enfin, pour montrer l'apport de cette modélisation fine des transports, nous

comparerons nos résultats avec ceux obtenus avec la modélisation simplifiée, sous Palkan, que nous avons utilisé durant la première partie. Pour toute cette étude, nous allons utiliser le logiciel de simulation Arena qui est parfaitement adapté à ce genre d'analyse. Le fait que nous ayons présenté les modélisations des transports sous forme de réseau de Petri à la partie précédente ne pose aucun problème et les concepts se transposent facilement sous Arena. Il est à noter que la comparaison finale entre les deux types de modélisation sera intégralement effectuée en simulation pour éviter de biaiser l'étude par d'éventuelles différences entre les résultats fournis par Palkan et Arena.

4.4.1. Contexte de l'exemple

Le système que nous allons étudier est constitué de deux usines, le site de Karlsruhe (à l'ouest de Stuttgart) fournissant le site d'Erlangen (nord de Nuremberg). Ces deux sites sont distants d'environ 260km. La carte de la figure 38 permet de repérer les deux sites. La solution actuelle est une liaison par train hebdomadaire entre les deux sites. Cet itinéraire est matérialisé en pointillés courts.

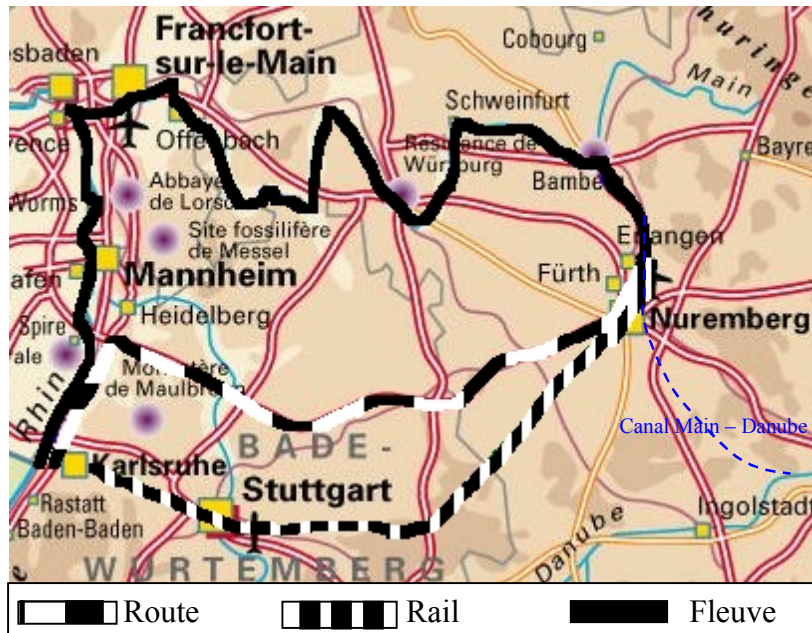


Figure 38 : Liaison Karlsruhe – Erlangen

L'usine de Karlsruhe usine les pièces en 6 étapes. Nous connaissons la durée liée à l'usinage d'un lot à chaque étape. Ces données sont portées dans le tableau 18. Le temps total

moyen pour qu'une pièce sorte de l'usine est donc d'un peu plus de 900 minutes (soit donc 15 heures).

Phase N°	Temps Moyen d'Usinage	Coefficient de variation	Ecart type
1	41.543	0.1284	5.334
2	222.431	0.1757	39.081
3	171.344	0.1740	29.813
4	185.270	0.1697	31.440
5	129.541	0.1740	22.540
6	152.406	0.1740	26.518

Tableau 18 : Temps d'usinage par phase

Comme nous allons surtout nous intéresser aux transports entre ces deux sites, les processus internes ne nous intéressent pas spécialement. En particulier, la seule chose qui nous intéresse concernant l'usine d'Erlangen est son rythme de consommation puisque vu depuis Karlsruhe, ce n'est qu'un client qu'il faut fournir. Son rythme est justement d'un lot toutes les 548 minutes (soit à peu près 9 heures) avec un coefficient de variation de 0.14 (ou un écart type de 76 pour renseigner Arena). De même pour le site de Karlsruhe, on ne prend pas en compte les phénomènes de blocage. On ne s'intéresse pas non plus à l'approvisionnement en matière première de ce site. Nous considérons donc que des pièces sont toujours disponibles dans le stock d'entrée de Karlsruhe. Toutes les durées sont représentées par des lois normales qui permettent de respecter fidèlement les valeurs moyennes et les coefficients de variation des données de base. En ce qui concerne le système d'information, les demandes de fabrication venant de la partie aval d'Erlangen sont transmises en entrée du site et entraînent la fabrication d'un produit en utilisant une pièce du stock d'entrée. Une pièce enlevée dans le stock d'entrée provoque une demande de fabrication en entrée du site de Karlsruhe.

4.4.2. Analyse de la solution actuelle

Les deux entreprises sont actuellement reliées par un train qui effectue une navette hebdomadaire. Les deux autres solutions envisageables sont la route (en pointillés longs sur la figure 38) et le fleuve (trait continu sur la figure). Concernant les autres transports que nous avons étudiés, un transfert maritime est évidemment impossible et un transfert aérien paraît économiquement peu raisonnable vue la très faible distance entre les sites. Nous allons maintenant étudier les trois possibilités.

4.4.2.a. Solution par rail

Pour évaluer la solution par rail (en pointillés courts dans la figure 38), nous allons considérer que le transport est direct entre les deux sites. En effet, même si les usines ne possèdent pas d'installation terminale embranchée, la proximité immédiate d'un centre de déchargement ne fait aucun doute. De plus, dans le cas où il n'y aurait pas d'ITE, un transfert complémentaire aurait lieu sur une distance tellement réduite qu'il peut être considéré comme pris en compte par les opérations de manutention. La liaison utilise donc une ligne régulière dont nous connaissons la fréquence, c'est-à-dire une fois par semaine (ou 1 fois toutes les 10080 minutes pour que les unités soient cohérentes). Nous utilisons les données que nous avons retenues pour caractériser le train, c'est à dire une vitesse de 60km/h, une capacité de 10 EVP et un coût de 4 eurocents par tonnes.kilomètres. Le modèle sous Arena correspond au cas du transport représenté par le réseau de Petri de la figure 34 (ligne régulière) et est fourni en annexe C. Le temps lié au transport est de 290 minutes pour le transport pur (60 km/h sur 290 km) auquel nous ajoutons un délai d'une heure de manière à prendre en compte les opérations de manutentions au départ et à l'arrivée. Nous avons associé au temps de transport un coefficient de variation du même ordre que les autres phénomènes traités (0.1). Les indicateurs de performances que nous allons étudier sont : le coût de transport sur une année, les niveaux des stocks, le nombre de ruptures de stock à Erlangen et le temps de séjour d'une pièce dans le système (Karlsruhe + train + Erlangen). Le coût est calculé de la manière la plus simple possible avec la formule : $\text{Coût de transport} = (\text{prix par tonnes.kilomètres}) \times (\text{distance entre les sites}) \times (\text{nombre de pièces par transport}) \times (\text{nombre de transports par an})$

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 19.

Indicateurs de performance	Valeur
Débit	0.109 pièces/heure
Ruptures Erlangen	0
Nombre total de liaisons	5211
Chargement moyen	18 lots
Chargement Maxi	26 lots
Chargement Mini	11 lots
Coûts de transport par an	11116 euros
Stock entrée Erlangen	16.43 lots
Stock sortie Karlsruhe	9.28 lots
Encours de la maille	28 lots
Délai de production	259 heures

Tableau 19 : Performances de la liaison hebdomadaire par train

Nous avons réalisé des simulations de manière à ne jamais avoir de rupture entre les deux sites tout en ayant un stock global le plus faible possible. Dans cette simulation, nous obtenons donc un fonctionnement sans rupture. Pour cela un encours minimal de 28 lots est nécessaire dans la maille « Karlsruhe-Transport-Entrée Erlangen ». Chaque semaine, le train transporte 18 lots en moyenne. Il ne voyage jamais à vide, son plus faible chargement est de 11 lots. La quantité la plus élevée est de 26 lots pour un transport, ce que nous avons considéré comme cohérent avec la capacité de transport du train. Les stocks en amont et aval du transport sont élevés par rapport à l'encours d'une part car la fréquence des transports conduit à une accumulation des pièces en attente à la sortie de Karlsruhe et d'autre part le niveau de stock en entrée à Erlangen dépend de la taille des chargements livrés par le train. Le délai entre l'entrée d'une pièce brute à Karlsruhe et son utilisation à Erlangen est élevé puisque la pièce peut attendre jusqu'à une semaine que le train passe. Enfin, notre indicateur de coût de transport nous donne un chiffre de 11116 euros pour l'année.

4.4.2.b. Solution par la route

Nous allons maintenant étudier la solution par la route (en pointillés longs dans la figure 38). Le transport est direct entre les deux sites. Il utilise très majoritairement l'autoroute sur les 280km du trajet. Nous prenons la valeur que nous avons fixée pour la vitesse, soit donc 70 km/h, une capacité de quelques EVP (en respectant donc le facteur 10 par rapport au train) et un coût de 8 eurocents par tonnes.kilomètres. Nous modifions uniquement la partie transport du modèle Arena. Cette partie de la modélisation est portée en annexe D. Ce cas de figure correspond au transport direct représenté par le réseau de Petri de la figure 30.

Les transports fonctionnent suivant une politique de seuil. Lorsque 5 lots sont terminés à Karlsruhe, ils sont embarqués par un camion et transportés jusqu'à Erlangen. Le temps lié au transport est de 240 minutes pour le transport pur (70km/h sur 280 km) auquel nous ajoutons un délai d'une heure de manière à prendre en compte les opérations de manutentions au départ et à l'arrivée. Nous tenons compte du temps de retour des camions qui doivent donc attendre 240 minutes supplémentaires pour être à nouveau disponibles. Nous avons associé au temps de transport un coefficient de variation du même ordre que les autres phénomènes traités (0.1). Les résultats sont présentés dans le tableau 20.

Indicateurs de performance	Valeur
Débit	0.109 pièces/heure
Ruptures Erlangen	0
Nombre total de liaisons	19185
Utilisation camion1	20%
Utilisation camion2	0%
Lots en attente à Karlsruhe	0
Coûts de transport par an	21487 euros
Stock entrée Erlangen	3.80 lots
Stock sortie Karlsruhe	1.99 lots
Encours de la maille	8 lots
Délai de production	73 heures

Tableau 20: Performances de la liaison par camion

Les indicateurs de performances étudiés sont encore : le coût de transport sur une année, les niveaux des stocks, le nombre de rupture de stock à Erlangen, le temps de séjour d'une pièce dans le système (Karlsruhe + camion + Erlangen) ainsi que le taux d'utilisation des différents camions. Tout comme dans le cas précédent, nous avons essayé d'obtenir un fonctionnement sans rupture en utilisant le moins de stock possible. Cette fois un encours de 8 lots est nécessaire car la fréquence des transports est plus importante. Nous obtenons le même débit que précédemment puisqu'il dépend de la consommation d'Erlangen. Dans sa configuration actuelle, le dipôle n'a besoin que d'un seul camion. En effet, le camion 1 n'est utilisé qu'à 20% du temps, le camion 2 n'est pas nécessaire et aucun lot prêt à être envoyé depuis Karlsruhe n'est mis en attente. Le stock d'entrée à Erlangen est conditionné par le fait que régulièrement, des paquets de 5 lots lui sont livrés et celui de sortie de Karlsruhe par le même phénomène au moment de l'expédition. Le délai de production est de 73 heures, ce temps étant notamment dû à l'attente que subissent les lots pour former un groupe de 5 et être transportés. Enfin, le coût annuel associé à ce mode de transport est de 21487 euros.

4.4.2.c. *Solution par le fleuve*

Nous allons maintenant étudier la solution utilisant le fleuve (trait continu dans la figure 38). Pour effectuer la liaison par fleuve, il faut utiliser trois voies d'eau, le Rhin de Karlsruhe à Mainz, puis le Main jusqu'à Bamberg et enfin le canal Main/ Danube jusqu'à Erlangen. Nous utilisons les données acquises précédemment, à savoir une vitesse de 10km/h, une capacité en centaine d'EVP et un coût de 3 cents par tonnes.kilomètres. Nous modifions la partie transport du modèle Arena pour revenir à une modélisation similaire au train (avec une

durée de transport différente). En effet, pour simplifier la modélisation nous considérons que nous n'empruntons qu'un seul transport. Cela est sans doute vrai entre Mainz et Erlangen vu que le canal Main – Danube est le seul prolongement possible au Main après Bamberg, par contre on peut supposer qu'un changement est nécessaire pour passer du Rhin au Main. Cependant, nous considérons que nous utilisons un transport unique, à fréquence régulière fixée à une semaine. Le temps de transport est de 3060 minutes (510 km effectués à 10 km/h) auquel nous ajoutons un délai d'une heure de manière à prendre en compte les opérations de manutentions au départ et à l'arrivée. Nous étudions les mêmes indicateurs de performances que dans les deux cas précédents. Nous nous plaçons une fois de plus dans un cas où il n'y a pas de rupture entre les deux sites. Pour cela, un encours de 32 lots est nécessaire. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 21.

Indicateurs de performance	Valeur
Débit	0.109 pièces/heure
Ruptures Erlangen	0
Nombre total de liaisons	5212
Chargement moyen	18 lots
Chargement Maxi	24 lots
Chargement Mini	13 lots
Coûts de transport par an	14664 euros
Stock entrée Erlangen	15.41 lots
Stock sortie Karlsruhe	9.25 lots
Encours de la maille	32 lots
Délai de production	292 heures

Tableau 21 : Performances de la liaison par le fleuve

La taille des chargements est de 18 lots ce qui est parfaitement compatible avec la capacité importante des bateaux. Le délai de production de 292 est évidemment assez long et les coûts liés à ce transport sont de 14664 euros par an.

4.4.2.d. Premier bilan

Finalement, si on considère l'aspect financier du transport, on peut donc considérer que la solution de la liaison par train hebdomadaire (celle qui a réellement été retenue) est la meilleure avec un coût annuel de 11116 euros (le plus faible) et des encours faibles (28 lots). Le seul cas permettant de fonctionner avec un encours plus faible, c'est à dire le camion, aboutit à un coût de transport presque deux fois plus élevé (21487 euros).

4.4.3. Amélioration par délocalisation d'un site

4.4.3.a. Le train

Dans cette partie, nous allons essayer de trouver des localisations pour les différents moyens de transports susceptibles d'améliorer la solution actuelle.

En ce qui concerne le rail, il nous faut choisir une ville située sur la voie actuelle, de manière à ne pas se pénaliser en rajoutant une liaison par camions. Nous avons donc 3 nouvelles localisations possibles, à savoir les villes de Stuttgart, Aalen et Ansbach situées respectivement à 215, 140 et 62 km d'Erlangen. Les résultats sont fournis dans le tableau 22.

	Karlsruhe	Stuttgart	Aalen	Ansbach
Distance (km)	290	215	140	62
Coûts de transport annuel (€)	11116	8239	5364	2376
Encours minimal (lots)	28	28	28	28
Stock entrée Erlangen (lots)	16.43	16.59	16.70	16.87
Stock sortie fournisseur (lots)	9.28	9.25	9.28	9.29
Taille des chargements (lots) Min/ moy/ max	11/ 18.39/ 26	12/ 18.35/ 26	12/ 18.40/ 26	10/ 18.40/ 26
Nombre de liaisons par an	52	52	52	52

Tableau 22 : Liaisons par train

En étudiant ces résultats, nous constatons peu de variations dans les différents indicateurs. En effet, le temps de parcours est dès le début très faible par rapport au délai entre deux tournées (35 fois plus court !). Par conséquent, le paramètre « temps de parcours » qui est celui que nous faisons varier en changeant de ville est quasiment sans effet sur le fonctionnement. Le paramètre important est la fréquence des livraisons que nous avons gardée à une par semaine. On remarque par contre que le coût diminue linéairement avec la distance puisque les autres paramètres restent fixes. Cette linéarité peut sembler simpliste mais cela est assez juste dans ce cas puisque la taille moyenne des chargements reste la même et que ce paramètre joue un grand rôle dans les variations par paliers du coût par tonnes.kilomètres. Du point de vue des transports et sans considérer d'autres aspects économiques ou politiques, il semble avantageux de se rapprocher le plus possible d'Erlangen.

4.4.3.b. La route

Pour la route, les possibilités sont plus élevées mais nous nous restreignons à quelques grandes villes entre Karlsruhe et Erlangen, à savoir Heilbronn, Ansbach et Nuremberg situées respectivement à 195, 62 et 20 km d'Erlangen. Les résultats sont dans le tableau 23.

	Karlsruhe	Heilbronn	Ansbach	Nuremberg
Distance(km)	280	195	62	20
Coûts de transport annuel (€)	21487	14959	4753	1534
Encours minimal (lots)	8	8	7	7
Stock entrée Erlangen (lots)	3.80	3.93	3.14	3.21
Stock sortie fournisseur (lots)	1.99	1.99	1.99	1.99
Utilisation du transport	20%	15%	7%	4%
Nombre de liaisons par an	191	191	191	191

Tableau 23 : Liaisons par camions

Pour la liaison par camion le prix décroît également quasi linéairement avec la distance ce qui est encore possible puisque nous avons gardé la taille des chargements fixe (5 lots). De plus, plus on rapproche les deux sites plus l'encours nécessaire pour éviter les ruptures diminue. On constate surtout que le camion servait déjà peu avec l'usine à Karlsruhe et lorsque les sites se rapprochent son utilisation devient très faible, ce qui peut être une information intéressante pour le choix d'un camion lié à la compagnie ou une sous-traitance du service. Avec le même nombre de pièces à produire par an et des chargements de taille fixe, on trouve qu'il faut faire 191 navettes par an quelle que soit la distance.

Enfin on observe que le niveau du stock d'entrée à Erlangen ne semble pas suivre une évolution linéaire. En fait, au fur et à mesure que la distance entre les sites décroît, le niveau moyen de ce stock augmente car il est plus vite réapprovisionné. Cette évolution est perturbée par le fait qu'entre Heilbronn et Ansbach il n'est plus nécessaire d'avoir le même encours pour éviter les ruptures et que l'on passe de 8 à 7 lots. Ainsi lorsqu'on réduit le nombre de lots dans la boucle, le niveau moyen des stocks à Erlangen diminue brutalement, d'où la discontinuité.

4.4.3.c. Le Fleuve

Enfin pour les bateaux nous avons retenu trois villes le long du canal : Mannheim (430 km), Francfort sur le Main (330 km) et Würzburg (190 km). Nous utilisons le modèle de la

partie 4.4.2.c pour faire l'analyse. Les résultats que nous obtenons sont exposés dans le tableau 24.

	Karlsruhe	Mannheim	Francfort	Würzburg
Distance (km)	510	430	330	190
Coûts de transport annuel (€)	14664	12363	9486	5465
Encours minimal (lots)	32	30	30	29
Stock entrée Erlangen (lots)	15.41	14.31	15.38	15.87
Stock sortie fournisseur (lots)	9.25	9.23	9.25	9.25
Taille des chargements (lots) Min/ moy/ max	13/ 18.39/ 24	13/ 18.36/ 24	12/ 18.38/ 25	12/ 18.36/ 25
Nombre de liaisons par an	52	52	52	52

Tableau 24 : Liaisons par bateau

Contrairement au cas du train précédemment étudié, la durée du trajet en bateau n'est pas négligeable par rapport à la semaine d'attente entre deux passages. Il y a en effet dans les cas les plus éloignés un rapport d'environ 1/3 entre le temps de transport et le délai entre deux passages du bateau. Ainsi en réduisant le temps de transport, on constate une réduction de l'encours nécessaire pour éviter les ruptures. Le coût est bien sûr en diminution et on atteint des prix compétitif en restant encore loin d'Erlangen (Würzburg qui est à 190 km est associé à un coût de 5465 € soit la moitié de la configuration d'origine).

4.4.3.d. Second bilan

Si l'on compare maintenant les trois types de transports, on trouve que chacun améliore la situation lorsque la distance diminue. Cependant, comme les prix par tonnes.kilomètres ne sont pas les mêmes, certains modes de transport offrent plus rapidement des prix compétitifs que d'autres. Ainsi, la liaison Würzburg - Erlangen en bateau qui fait 190 km est associée à un coût de 5465 €, alors qu'Heilbronn – Erlangen par camion qui fait 195 km « coûte » encore 14959 €. Les coûts respectent bien sûr la logique des prix par tonnes.kilomètres et les solutions les moins chères sont offertes par le bateau. Cependant, si l'on s'intéresse à d'autres phénomènes que le seul prix des transports, le choix peut différer. En effet, les encours nécessaires dans le cas du bateau sont quasiment 4 fois supérieures à ceux du camion ce qui peut donc conduire à des choix différents.

4.4.4. Comparaison avec la modélisation du modèle typique

Pour étudier les avantages d'une modélisation plus fine, nous allons maintenant nous baser sur deux exemples précis : le cas actuel de liaison par train hebdomadaire entre Karlsruhe et Erlangen et le cas du transport par camion. Nous transposons donc sous Arena, et avec des lois normales, la modélisation que nous utilisons sous Palkan. Le modèle se trouve en annexe E.

4.4.4.a. Cas de la route

La modélisation des usines reste la même mais la partie transport est remplacée par un simple délai. Dans le cas du camion, par rapport à la modélisation fine, nous perdons donc la notion de taille des lots ainsi que la notion de retour à vide des camions. Le temps de transport lui-même reste juste et les pièces attendent si le camion n'est pas disponible. Nous simulons sur la même durée que les cas précédents et nous pouvons comparer les résultats avec la modélisation fine dans le tableau 25.

Indicateurs de performance	Modélisation simplifiée	Modélisation fine
Débit	0.109 pièces/heure	0.109 pièces/heure
Ruptures Erlangen	0	0
Nombre total de liaisons	/	19185
Coûts de transport par an	21475 euros	21487 euros
Stock entrée Erlangen	1.8 lots	3.80 lots
Stock sortie Karlsruhe	0	1.99 lots
Utilisation du transport	54%	20%
Encours de la maille	4	8
Délai de production	36 heures	73 heures

Tableau 25 : Comparaison entre les modélisations du transport par camion

La première chose visible, c'est que nous avons perdu la réalité physique des opérations puisque maintenant les pièces sont transférées une à une. Nous obtenons donc des résultats concernant le délai de production ou l'encours nécessaire au fonctionnement qui ne reflètent pas le cas réel. Ces données ne sont donc pas valables. En ce qui concerne le coût, on retrouve sensiblement la même valeur car nous avons conservé une formule simple et que finalement la taille des lots n'a pas une grande importance dans cette formule. Cependant la modélisation

fine laisse possible une amélioration de cette formule en faisant varier plus de paramètres alors que nous ne pourrions pas faire de raisonnement plus fin avec la modélisation simple.

4.4.4.b. Cas du rail

Dans le cas du transport par train, nous remplaçons également la partie transport par un simple délai. Avec ce changement de modélisation, nous perdons totalement la notion de synchronisation avec un départ à heure fixe qui était la caractéristique marquante de la liaison par ligne régulière. Nous perdons également la notion de lots et le temps que nous affectons au transport est forcément erroné puisque cette durée dépend de la date de production de la pièce dans la semaine. Nous avons choisi de traiter tous les clients au fur et à mesure qu'ils arrivent (équivalent d'un serveur infini en files d'attente) puisque la notion de « premier arrivé/ premier servi » n'a plus de sens dans ce cas de gestion calendaire. Nous obtenons les résultats du tableau 26.

Le cas du train est plus critique que celui du camion puisque maintenant, la modélisation simplifiée n'est plus du tout adaptée. En effet, nous ne modélisons pas la synchronisation entre le transport et la marchandise, les durées de transport sont donc forcément inexactes. Ce décalage entre la modélisation et le fonctionnement réel nous fait obtenir des valeurs fausses pour le délai de production, l'encours de la maille et les niveaux de stock. De plus, la modélisation simplifiée ne nous permet pas d'évaluer la taille réelle des chargements ainsi que le stock de sortie de Karlsruhe puisque le traitement des lots est immédiat.

Indicateurs de performance	Modélisation simplifiée	Modélisation fine
Débit	0.109 pièces/heure	0.109 pièces/heure
Ruptures Erlangen	0	0
Nombre total de liaisons	/	5211
Chargement moyen	/	18 lots
Chargement Maxi	/	26 lots
Chargement Mini	/	11 lots
Coûts de transport par an	11119 euros	11116 euros
Stock entrée Erlangen	6.15 lots	16.43 lots
Stock sortie Karlsruhe	/	9.28 lots
Encours de la maille	17 lots	28 lots
Délai de production	155 heures	259 heures

Tableau 26 : Comparaison entre les modélisations du transport par train

Pour les mêmes raisons que dans le cas précédent, le coût associé est exact mais là aussi, nous pouvons affiner ce coût en nous appuyant sur la modélisation fine alors que cela n'est pas possible en modélisation simple.

4.4.4.c. Bilan de l'étude

Nous avons vu que nous perdions beaucoup d'informations en simplifiant la modélisation mais nous allons regarder si les données que nous obtenons nous permettent quand même de réfléchir au problème. Nous reprenons le cas du camion et faisons varier la localisation du fournisseur entre Karlsruhe et Nuremberg. Nous comparons les données communes aux modèles détaillé et simplifié dans le tableau 27.

Tout d'abord, les deux modélisations donnent la même tendance générale, plus on s'approche plus les prix et les stocks décroissent. Par contre, si on désire analyser plus finement les performances, on n'arrive pas aux mêmes conclusions. Ainsi dans le cas du modèle détaillé, le changement critique sera le passage de Heilbronn à Ansbach car on aura alors un lot de moins nécessaire au bon fonctionnement, ce qui impacte la plupart des indicateurs. Ce changement n'intervient en modélisation simplifiée que lorsqu'on passe à Nuremberg, ce qui conduira donc à des conclusions différentes quant au choix des sites.

Indicateur	Modèle	Karlsruhe	Heilbronn	Ansbach	Nuremberg
Coûts de transport annuel (€)	Détaillé	21487	14959	4753	1534
	Simplifié	21475	12876	4065	1303
Encours minimal (lots)	Détaillé	8	8	7	7
	Simplifié	4	4	4	3
Stock entrée Erlangen (lots)	Détaillé	3.80	3.93	3.14	3.21
	Simplifié	1.80	1.93	2.14	1.21
Stock sortie fournisseur (lots)	Détaillé	1.99	1.99	1.99	1.99
	Simplifié	0	0	0	0
Utilisation du transport	Détaillé	20%	15%	7%	4%
	Simplifié	54%	41%	20%	14%
Délai (heures)	Détaillé	73	73	63	63
	Simplifié	36	36	36	27

Tableau 27 : Comparaison entre les modélisations du transport par route pour l'étude de délocalisation

Ainsi, bien que la tendance générale observée soit la même, les deux modèles aboutissent à des conclusions différentes.

4.4.5. Conclusions

Finalement, même si la modélisation simplifiée donne déjà la tendance globale, l'utilisation d'une modélisation fine s'accompagne bel et bien d'une amélioration de la pertinence des résultats puisqu'elle représente plus fidèlement le fonctionnement réel des transports. Cela peut donc permettre de mettre en lumière des phénomènes qui n'auraient pu être étudiés avec une modélisation simple. Les problèmes pour utiliser une modélisation fine avec les méthodes analytiques concernent la gestion de la taille des lots ainsi que les synchronisations temporisées.

La gestion des lots est indispensable pour modéliser les transports directs ainsi que les opérations de regroupement. Palkan n'est pas encore en mesure de prendre en compte cet aspect mais des progrès dans les méthodes analytiques permettant de régler ce problème sont envisageables.

L'autre problème est la synchronisation avec un compteur régulier qui permet de modéliser le transport par lignes régulières. Dans ce cas là, il faudrait pouvoir étudier des systèmes avec une synchronisation temporisée représentant la nature cyclique du transport. Ce problème semble plus dur à traiter par les méthodes analytiques car, comme nous avons pu le constater au moment de la construction du modèle réseau de Petri de la figure 34, de nombreuses difficultés secondaires viennent se greffer sur le problème principal. Tout d'abord, cette modélisation nécessite au préalable de gérer la taille des lots. Ensuite, il faut être en mesure de décider au moment de la synchronisation si toutes les pièces peuvent être transportées ou pas et surtout savoir gérer le cas où le nombre de pièces transportées est inférieur à la place prévue, auquel cas la synchronisation est déséquilibrée. Cette amélioration paraît donc plus difficile à mettre en œuvre dans une méthode analytique.

4.5. Synthèse sur la modélisation des transports

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'impact d'une modélisation plus fine des transports. En effet, ce type d'amélioration pourrait représenter une perspective de développement intéressante pour les procédures de résolution analytique, mais encore faut-il vérifier que cela apporte une amélioration concrète.

Pour procéder, nous avons commencé par étudier les pratiques industrielles de transports par route, mer, rail et fleuve. Les transports aériens n'ont pas été retenus vue leur

faible part de marché dans ce domaine et nous n'avons pas considéré non plus les transports par conduites. Nous avons donc répertorié les différentes organisations liées à ces modes de transports pour aboutir finalement à quatre types : le transport direct, le transport avec regroupement, le transport par une ligne régulière et les possibilités d'externalisation du stock même si ce dernier cas est plus connexe à l'organisation du transport lui même. Nous avons donc proposé une modélisation pour chacun de ces modes et nous les avons testées sur un exemple.

Cet exemple inspiré de l'industrie, nous a permis de modéliser des transports par route, rail et fleuve et de conduire une étude avec le logiciel de simulation Arena. Nous avons ensuite comparé la modélisation fine d'Arena avec celle que nous utilisons avec Palkan. Les résultats ont permis de vérifier que le passage à la modélisation de type Palkan provoquait la perte de nombreuses informations. Ainsi, si les deux modélisations permettent bien d'observer les mêmes grandes tendances, les conclusions ne sont pas les mêmes lorsque l'on fait une analyse plus précise. En particulier dans notre cas, les deux études donnent des lieux d'implantation différents pour les usines, ce qui prouve bien l'intérêt d'une modélisation fine.

Les problèmes pour mettre en œuvre cette modélisation fine avec les méthodes analytiques concernent la gestion de la taille des lots ainsi que les synchronisations temporisées. La gestion des lots est indispensable pour modéliser les transports directs ainsi que les opérations de regroupement. Ce problème paraît être le moins complexe à régler. En effet, concernant la synchronisation avec un compteur régulier qui permet de modéliser le transport par lignes régulières, de nombreuses difficultés secondaires viennent se greffer sur le problème principal. Cette amélioration paraît donc plus difficile à mettre en œuvre rapidement dans une méthode analytique.

Chapitre 5

Exploration d'autres modes de gestion du réseau

Dans cette partie, nous allons étudier deux autres politiques de gestion du réseau. Il s'agit du kanban généralisé et du kanban étendu.

En effet, une limite du kanban est la gestion de la remontée des informations qui est liée à la production des pièces. L'intérêt du kanban généralisé va être de modifier ce fonctionnement de manière à accélérer cette remontée des informations. Nous allons appliquer ce contrôle à notre réseau et tester ses performances pour vérifier l'impact sur les performances du réseau. Nous discuterons ensuite des manières d'implanter physiquement une telle politique de gestion dans une chaîne logistique.

L'autre politique a pour objectif de représenter un fonctionnement par « hub », c'est à dire par centralisation de l'information. Ce type d'organisation est celui vers lequel tendent les industriels, il est donc important de réfléchir à sa modélisation. Nous allons utiliser le kanban étendu pour cette modélisation. Nous essayerons d'observer les performances obtenues avec cette politique avant de discuter des avantages concrets qu'elle offre. Nous étudierons enfin la manière d'implanter physiquement cette politique.

Quandoque bonus dormitat Homerus...

5.1. Introduction

Un inconvénient lié au kanban est que la transmission de l'information en amont peut parfois se révéler trop lente. En effet, l'information de demande n'est envoyée en amont que lorsque la demande aval a été satisfaite. En particulier, dans le cas où beaucoup de demandes du client final sont placées en attente, les stocks amont n'en sont pas informés et ne produisent vraisemblablement pas. L'information ne va remonter le long du réseau qu'au rythme de la livraison des demandes retardées.

Nous allons donc mettre en œuvre une politique de gestion par kanban généralisé au niveau de notre réseau logistique de manière à accélérer le transfert de l'information en n'attendant plus les livraisons pour faire remonter les demandes.

5.2. Gestion du réseau en kanban généralisé

Dans cette partie, nous allons voir les changements occasionnés par une gestion en kanban généralisé par rapport au kanban utilisé précédemment. Nous ferons une comparaison de ces deux politiques sur notre modèle typique de chaîne logistique avec Palkan pour vérifier que notre système devient bien plus réactif et nous verrons ensuite comment réellement gérer notre réseau en kanban généralisé d'un point de vue pratique.

5.2.1. Présentation du kanban généralisé

Le kanban généralisé est une politique principalement mise au point par Buzacott [BUZ 89]. Les avantages de cette politique par rapport au kanban ont été montrés dans le cas de systèmes de production linéaire dans [DUR 97] et [DUR 00]. En effet, avec cette gestion, la remontée des demandes le long du réseau n'est plus liée aux transferts de matières mais se fait de manière indépendante. Ce mécanisme est illustré par la figure 39.

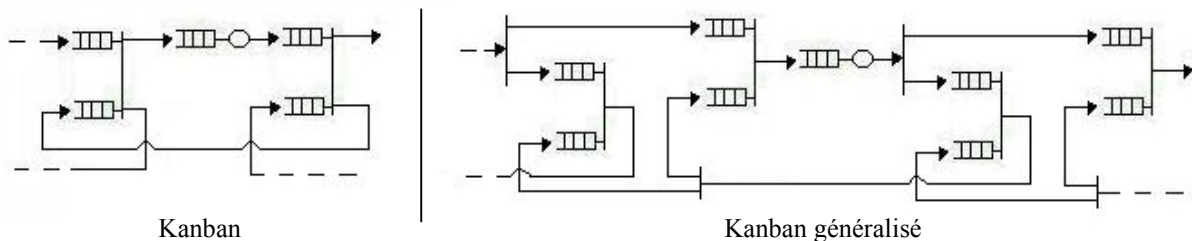


Figure 39 : Mailles en kanban et kanban généralisé

Sur cette figure, on observe que les synchronisations du kanban « classique » sont dédoublées. Ainsi, dès la fin de la production, la pièce et son kanban sont rangés dans des files différentes ce qui permet aux demandes du client de remonter le long du réseau sans attendre les transferts de matières entre les sites. Pour que la demande continue à remonter, il suffit qu'il y ait des kanbans en nombre suffisant. Dans chaque maille, on a deux paramètres : le nombre de kanbans et le nombre de produits finis. On peut ainsi accélérer la remontée des informations en augmentant le nombre de kanbans, tout en gardant un nombre de produits finis faibles. Enfin, on peut signaler deux cas particuliers notables : si le nombre de kanbans est égal au nombre de produits finis, la gestion est équivalente au kanban et si le nombre de kanbans tend vers l'infini, elle est équivalente au base-stock.

5.2.2. La notion de kanban généralisé dans le réseau logistique

Au niveau d'une chaîne logistique, lorsqu'on applique une gestion par kanban généralisé, un site n'a plus besoin d'attendre d'avoir livré son client pour demander à être réapprovisionné lorsqu'il reçoit une demande. Il peut transmettre immédiatement cette demande en amont contrairement au kanban « normal ». Pour bien comprendre la différence, nous commençons par reprendre dans la figure 40 le fonctionnement d'un site du réseau géré par kanbans, du point de vue de la gestion des informations.

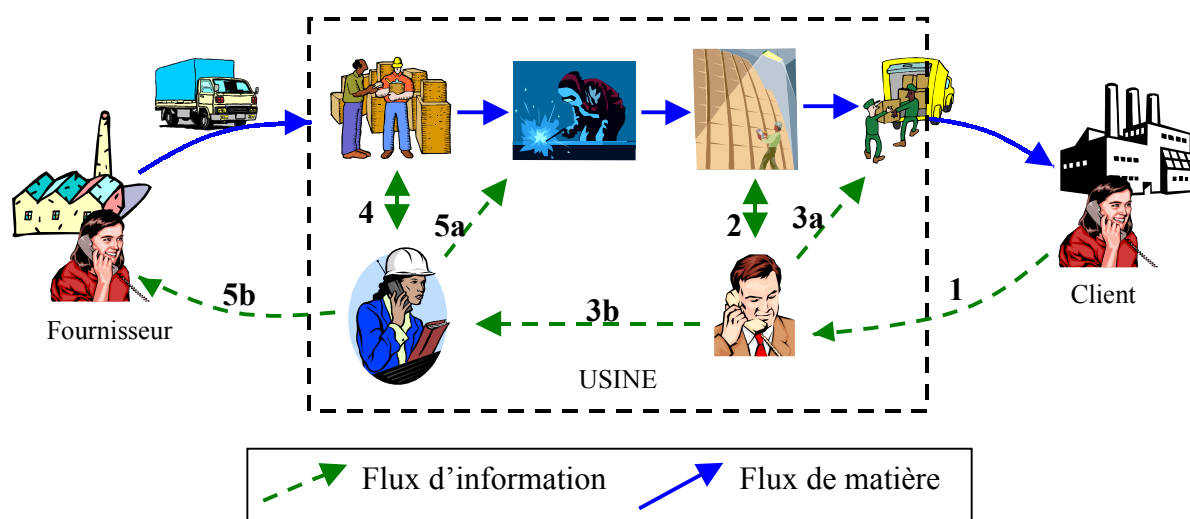


Figure 40 : Le traitement de l'information par les kanbans

Lorsqu'un client passe une commande (1), l'usine essaye de répondre à son besoin en examinant le niveau du stock (2). Tant qu'on ne dispose pas de pièces dans le stock de

produits finis, l'information est bloquée. Lorsque l'usine peut répondre au besoin, elle effectue un envoi vers le client et génère simultanément un ordre de fabrication de manière à reconstituer son stock (3a & b). Cet ordre de fabrication est étudié en entrée de l'usine pour voir si les pièces brutes nécessaires sont présentes (4). Si il n'y en a pas, l'information est à nouveau bloquée. Lorsque l'on dispose des pièces nécessaires, on lance une fabrication et on envoie simultanément une commande vers le fournisseur de manière à reconstituer le stock d'entrée (5a & b). Ces blocages de l'information sont évidemment un frein à la performance mais l'avantage du kanban est de borner tous les stocks de l'usine, que ce soit des produits finis ou de l'encours.

Dans le cas du kanban généralisé, le passage de l'information n'est plus lié aux contraintes matérielles comme le niveau des stocks puisque l'information est traitée à part. On explique sur le schéma 41 ce traitement de l'information.

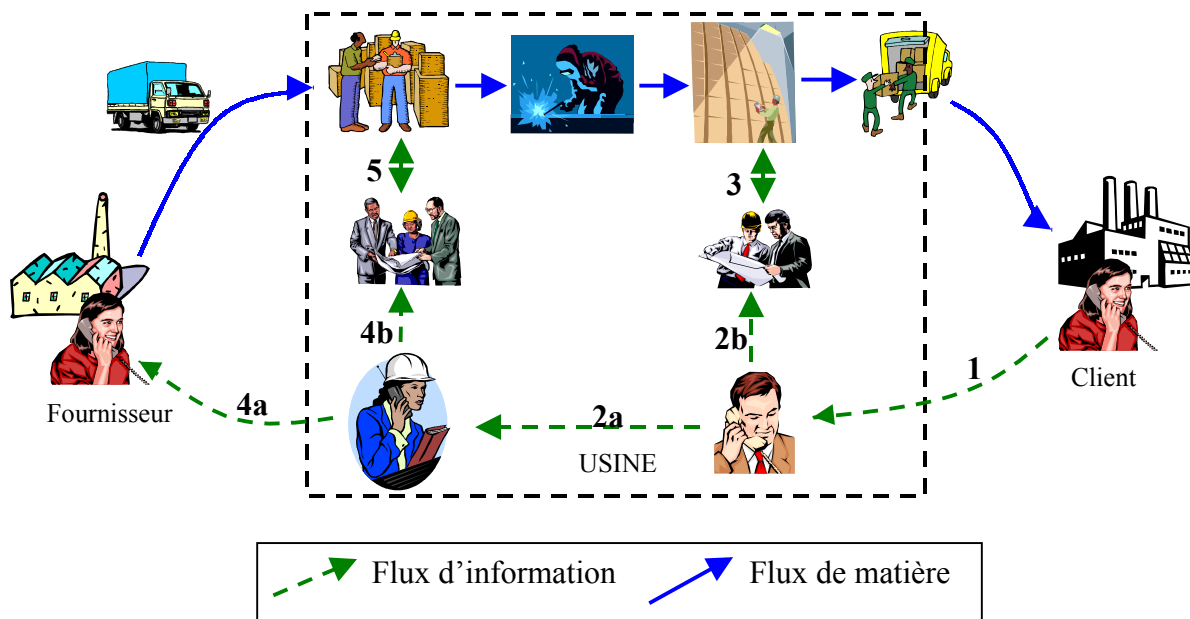


Figure 41 : Le traitement de l'information par le kanban généralisé

L'événement déclencheur est toujours la commande du client (1). Lorsque la commande est reçue, les parties « information interne » (2a) et « envoi de la commande » (2b) deviennent indépendantes alors qu'elles étaient simultanées pour le kanban. Si le quota d'ordres de fabrication lancés n'est pas excédé (cette limite étant fixée en choisissant le nombre de kanbans dans la maille), on en transmet un nouveau en amont de l'usine (2a). Indépendamment de cela, on fait part de la commande du client à la gestion des stocks (2b). La commande sera traitée lorsque des produits finis seront disponibles (3) mais cela n'a pas

d'impact sur la remontée des informations dans l'usine. De même, lorsque l'ordre de fabrication interne arrive en entrée de l'usine, on génère de manière indépendante une commande vers le fournisseur, si le nombre de commandes en cours n'excède pas un certain quota (ce quota étant toujours fixé par le nombre de kanbans), et un ordre de fabrication vers la gestion du stock d'entrée. Ensuite, lorsque des pièces sont disponibles dans le stock d'entrée, la fabrication d'une pièce commence. Ainsi, la gestion de l'information n'est plus liée aux flux de matières et cela peut permettre de gagner du temps en lançant des ordres de fabrication plus rapidement en amont dans le réseau.

Le nombre de kanbans représentant la quantité d'informations que nous pouvons transporter peut maintenant être différent de la valeur maximale du stock de sortie (ce qui n'était pas le cas en kanban). L'intérêt est donc que nous pouvons choisir un nombre de kanbans supérieur au nombre maximal de pièces finies, ce qui nous permet de continuer à faire remonter l'information lorsque le stock de sortie est vide et que les demandes retardées s'accumulent (ce qui était impossible en kanban). Nous allons maintenant appliquer le kanban généralisé à notre modèle typique de chaîne logistique.

5.2.3. Illustration de l'intérêt de la gestion par kanban généralisé

Nous changeons la gestion de tous les postes du réseau logistique typique pour utiliser le kanban généralisé. Nous allons effectuer plusieurs tests de manière à montrer que le comportement du réseau est meilleur ainsi.

5.2.3.a. Amélioration du taux de service

Dans ce test, nous allons montrer que certains cas, que le kanban n'arrivait pas à bien gérer, peuvent être sensiblement améliorés en passant en kanban généralisé. Nous utilisons deux configurations pour évaluer le kanban généralisé. Dans la première, nous utilisons 6 kanbans par boucle et 5 produits finis. Cela signifie que les stocks d'entrée ou de sortie des usines ne pourront pas excéder la valeur 5, comme c'était déjà le cas avec le kanban. Par contre les 6 kanbans vont nous permettre d'accélérer l'information et éventuellement de fonctionner avec un encours plus élevé que dans le cas d'origine. Dans la deuxième configuration, nous utilisons 7 kanbans ce qui nous permet d'accélérer encore plus l'information mais nous limitons les stocks de produits finis à 4. Nous allons juste comparer ces deux gestions avec le kanban. En effet, le but de cette étude n'est pas de faire une analyse

exhaustive du comportement du kanban généralisé mais simplement de montrer les améliorations facilement apportées par celui-ci par rapport au kanban.

Pour cela, nous allons utiliser les résultats que nous avons obtenus dans la partie précédente. En effet, lors de l'étude de paramètres nous avons mis en avant plusieurs configurations où le réseau géré en kanban ne pouvait garantir un taux de service de 100%. Ces différentes configurations sont rappelées dans le tableau 28. Nous plaçons donc dans les mêmes configurations le réseau piloté cette fois par du kanban généralisé et nous étudions le taux de service pour chacun des trois clients. Nous présentons ensuite les résultats obtenus pour le kanban et le kanban généralisé sur la figure 42.

N° du cas	Description
1	Les revendeurs n'ont qu'un kanban chacun
2	Le transport entre les fournisseurs et les usines 1 et 2 est ralenti
3	Le transport entre les centres de distributions et les revendeurs est ralenti
4	Tous les transports sont plus lents
5	L'usine d'assemblage est plus lente
6	Les usines 1 et 2 sont plus lentes
7	Les centres de distribution sont plus lents
8	Les transports et l'usine d'assemblage sont plus lents et la demande plus forte
9	La demande du client 1 est plus élevée

Tableau 28 : Description des cas testés pour comparer les politiques de gestion

Dans les figures suivantes, nous avons séparé le taux de service pour le client 1 d'un côté et le taux de service pour les clients 2 et 3 de l'autre. On rappelle que pour des raisons de symétrie du réseau (et lorsque les demandes restent identiques) les taux de service des clients 2 et 3 sont identiques. C'est pourquoi nous les regroupons sur la même courbe.

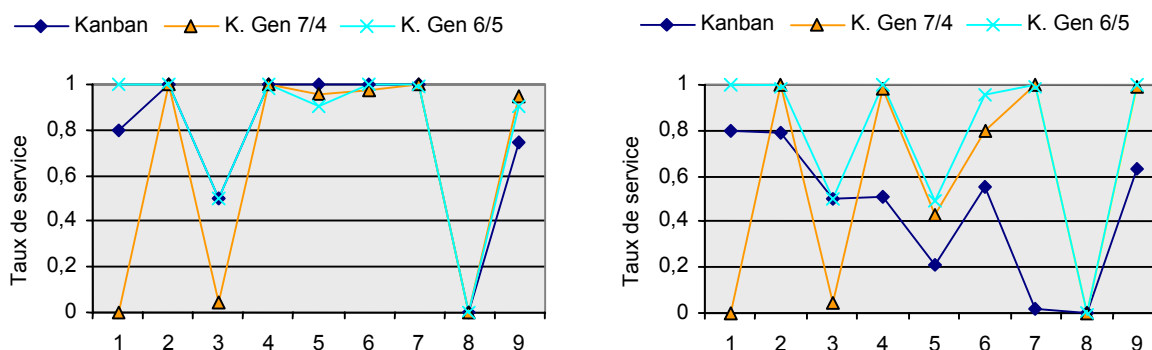


Figure 42 : Taux de service pour les clients 1

Taux de service pour les clients 2 ou 3

On constate donc que les résultats se sont sensiblement améliorés en utilisant le kanban généralisé avec 6 kanbans. Dans le cas 9 le taux de service est amélioré pour toutes les références lorsqu'on passe du kanban au kanban généralisé. Dans les cas 2, 4 et 7, le taux de service pour le premier client reste inchangé puisqu'il était déjà à 100% et le taux de service des clients 2 et 3 est amélioré. Seul les cas 5 et 6 font apparaître un taux de service inférieur pour la référence 1 mais les taux de service des produits 2 et 3 sont eux nettement meilleurs. Le kanban avait eu tendance à favoriser le client 1 (100% de taux de service) au détriment des clients 2 et 3 (20% de taux de service chacun). Le kanban généralisé rééquilibre la distribution avec par exemple 90% de taux de service pour le client 1 et 55% pour les clients 2 et 3 dans le cas 5. On peut également noter que dans les cas 3 et 8 aucune amélioration n'a eu lieu. Dans le cas 3, on peut supposer que cela est dû au fait que nous avons ralenti les transports finaux (les plus proches du client) et que l'accélération de l'information dans le réseau ne peut donc pas compenser une lenteur si proche du client. Ainsi, l'information circule peut être plus rapidement mais rien ne peut compenser la lenteur avec laquelle les pièces sont finalement livrées au client. D'ailleurs on voit que lorsqu'on diminue le stock de sortie (cas 7 kanbans, stock à 4), les performances se dégradent. Enfin le cas 8 est un cas extrême où tous les paramètres sont défavorables et un changement de politique n'est donc pas suffisant pour résoudre le problème. Même en augmentant fortement le nombre de kanbans dans le kanban généralisé, il est difficile d'améliorer les performances.

Nous avons donc pu constater que dans la plupart des cas, le kanban généralisé nous permettait d'obtenir un meilleur taux de service. Nous allons maintenant étudier la manière dont il modifie le fonctionnement du réseau.

5.2.3.b. Amélioration de la transmission de l'information

Pour étudier plus en détail l'impact du kanban généralisé sur le réseau, nous prenons le cas 9 du tableau 28, où le passage au kanban généralisé permet d'améliorer le taux de service des trois clients. Nous choisissons la configuration de kanban généralisé avec 6 kanbans et 5 produits finis. Pour étudier les changements dans le réseau, nous étudions les niveaux moyens de tous les stocks dans les deux cas de figure. La comparaison entre les résultats des deux politiques de gestion est faite dans la figure 44. Avant cela, la figure 43 explicite les numéros de stock employés par la suite sur la courbe.

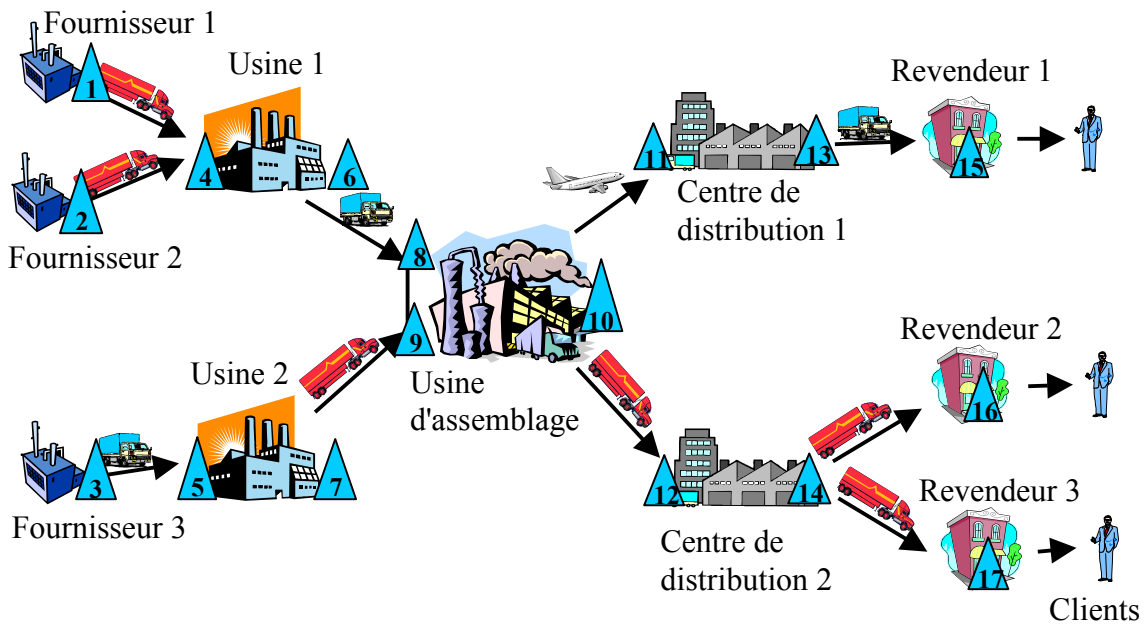


Figure 43 : Numérotation des différents stocks du réseau

On porte sur la courbe suivante les niveaux moyens de chaque stock du réseau en fonction de la politique de gestion choisie.

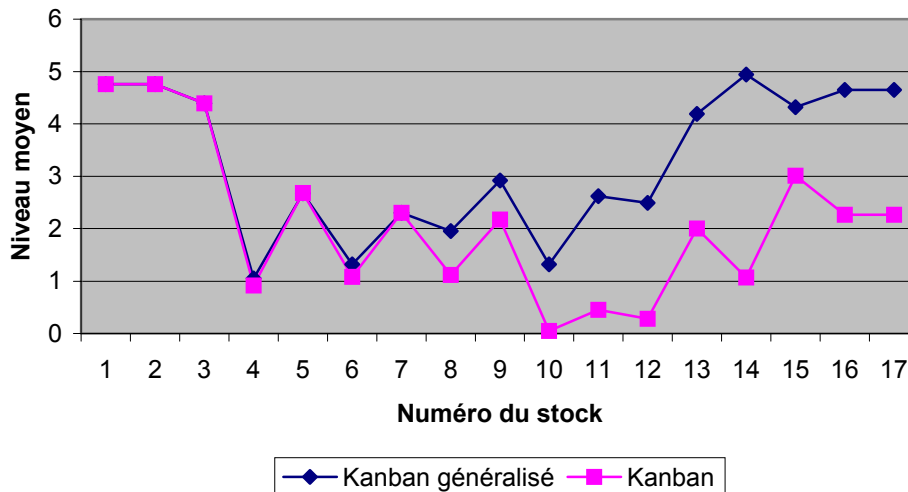


Figure 44 : Niveau moyen des stocks du réseau suivant la politique de gestion

La première constatation est bien sûr que le kanban généralisé nous permet d'avoir des stocks moyens plus élevés, ce qui explique que le service client ait été meilleur dans ce cas là. De plus, si nous nous rappelons que les unités les plus lentes sont les transports et les usines et

que les plus rapides sont les fournisseurs et les centres de distribution, nous pouvons affiner cette analyse. En effet les stocks des fournisseurs (notés 1, 2 et 3) sont situés entre des entités rapides et des transports qui sont plus lents, leur niveau est donc élevé quelle que soit la politique de gestion. Dans les deux cas les stocks chutent ensuite sensiblement. Si l'on regarde la partie concernant l'usine 1 (stocks numéros 4, 6 et 8) et l'usine 2 (stocks numéros 5, 7 et 9) l'influence du kanban généralisé commence à se faire sentir en maintenant des niveaux de stock plus élevés. Ces deux usines alimentent l'usine d'assemblage qui doit elle-même alimenter les deux centres de distribution. C'est à ce point stratégique que le kanban généralisé fait la différence. Sa gestion plus rapide de l'information permet de maintenir un faible stock en sortie de l'usine d'assemblage, de manière à répondre efficacement à la demande alors que dans le cas de la gestion par kanbans les pièces arrivant trop lentement sont immédiatement envoyées aux centres de distributions. La valeur moyenne du stock de sortie de l'usine d'assemblage est presque à 0. Par la suite, les niveaux de stock remontent car les centres de distribution sont associés à des temps opératoires très courts. Leurs stocks de sortie ont donc des valeurs plus élevées (numéros 13 et 14). Mais dans le cas du kanban, on observe toujours un certain retard et les pièces restent peu dans les stocks pour aller rapidement répondre à la demande. Dans le cas du kanban généralisé par contre, la demande ne met pas le système en difficulté et une fois les sites les plus lents passés, on retrouve un niveau de stock équivalent au début du réseau. On voit donc bien l'amélioration qu'apporte cette politique et on imagine d'ailleurs que l'on est maintenant en position de répondre à une demande des clients plus forte.

Cette petite étude illustre bien l'intérêt d'accélérer le transfert d'informations puisque sans transformation majeure (sans construire ou détruire des sites) nous avons réussi à très nettement améliorer les performances du réseau. Nous allons maintenant voir comment pourrait fonctionner de manière pratique une entreprise du réseau si elle suivait un fonctionnement en kanban généralisé.

5.2.4. Utilisation pratique du kanban généralisé dans le réseau

Nous allons maintenant détailler la manière dont peut fonctionner chaque entreprise du réseau dans le cadre d'une gestion globale par kanban généralisé.

5.2.4.a. Utilisation en multiproduit

Jusqu'à présent, nous avons traité le cas monoproduit pour ne pas compliquer inutilement les explications. Pourtant dans la pratique, ce système est fait pour fonctionner en multiproduit. Dans la suite, nous allons donc considérer que 3 références différentes sont fabriquées. Le fonctionnement d'un site s'articule autour de 4 points de surveillance comme le montre la figure 45.

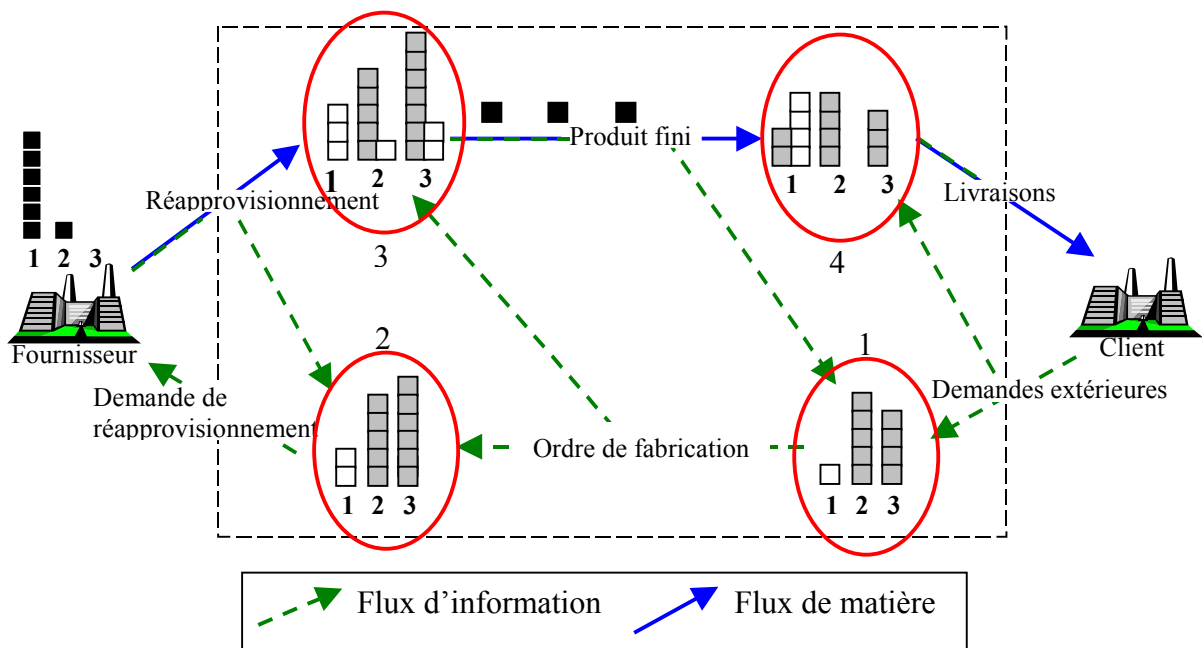


Figure 45 : Les indicateurs du kanban généralisé dans le cas multi-produit

Le fonctionnement dans l'entreprise est donc le suivant : Notre client immédiat nous passe une commande. Cette commande est traitée en deux endroits simultanément.

- Au niveau du stock de produit fini (4), on regarde si on a assez de pièces pour répondre à la commande. Notre quantité de produits finis est matérialisée par des étiquettes grises dans notre tableau. Si nous avons assez de produits, nous livrons le client et enlevons autant d'étiquettes grises de la référence correspondante que de lots expédiés dans notre tableau de bord. Si nous n'avons plus de produits, nous matérialisons ces demandes en attente par des étiquettes blanches dans la référence correspondante. Enfin si nous avons la référence correspondante mais en quantité insuffisante, deux cas se posent. Nous préférons livrer la commande en retard en une seule fois et nous attendons donc d'avoir autant d'étiquettes grises que de blanches dans le tableau. Ou alors, nous livrons immédiatement ce que nous avons en stock et le

reste de la commande dès que nous l'aurons et on ôte alors toutes les pastilles grises disponibles puis on matérialise les commandes que nous n'avons pu honorer par des étiquettes blanches. Ce choix dépend de plusieurs paramètres : l'urgence de la commande pour le client, la liaison entre les deux sites, etc.

- La même demande de notre client est également examinée au point 1 de manière à ne pas submerger l'usine d'un encours trop important. Dans le tableau lié à cette fonction, se trouve pour chaque référence des étiquettes grises qui correspondent à des autorisations de lancer des ordres de fabrication. Le fonctionnement de ce tableau est simple, il n'y a ni problèmes de lot ni de seuil. Si nous avons assez d'étiquettes grises (les autorisations), nous faisons remonter la demande en amont (au point 2) en enlevant autant d'étiquettes que nous lançons d'ordres. Si nous n'avons plus d'étiquettes grises ou que la quantité de demandes à transmettre excède ce nombre, nous matérialisons les demandes en trop par des étiquettes blanches. Pour une même référence, il ne peut y avoir simultanément d'étiquettes grises et blanches car cela signifierait que nous avons une demande et une autorisation en même temps.

Les ordres de fabrication autorisés à remonter ont alors le même effet que la demande extérieure un niveau en amont. Ainsi, le poste 2 a le même fonctionnement que le poste 1 et le poste 3 a le même fonctionnement que le poste 4. Les sites amont et aval ont également exactement le même fonctionnement. Il reste à préciser que les autorisations de lancer des ordres de fabrications reviennent au contrôle de l'encours lorsqu'un produit fini de la référence correspondante entre dans le stock. De même, une autorisation ne revient au contrôle du réapprovisionnement que lorsque notre fournisseur nous livre la référence correspondante.

Nous allons éclaircir ce discours par un exemple. Nous partons d'une situation initiale où l'on a 6 autorisations pour chaque références aux postes 2 et 3 et un nombre de produits finis et de pièces brutes de 5 pour chaque références aux postes 3 et 4. Nous avons donc des étiquettes grises à tous les niveaux et aucune étiquette blanche. Nous allons faire évoluer ce système vers la situation de la figure 45. Si on reçoit deux commandes successives de 5 et de 4 lots de la référence 1, on livre immédiatement nos 5 lots disponibles depuis le poste 4. On envoie également 6 autorisations de produire vers le poste 3 et on garde les trois autres demandes en attente au poste 1. Au poste 3, 5 des 6 autorisations prennent les pièces brutes permettant de faire la référence 3, la sixième est mise en attente sous forme d'une étiquette blanche. Au poste 2, les 6 ordres de fabrication permettent d'envoyer 6 demandes de réapprovisionnement puisque nous avons 6 étiquettes grises en attente. Le nombre des

étiquettes grises pour la référence 1 tombe donc à 0. Maintenant, l'usine reçoit une commande de référence 2 et deux commandes de référence 3. Par le même principe, on livre le client et on fait remonter l'information ce qui enlève deux étiquettes grises (autorisations) au niveau des postes 1 et 2. Dans le même temps, on a placé des ordres de fabrication au poste 3 mais la ligne de production est déjà prise par la référence 1, ces trois nouveaux ordres doivent donc attendre et sont matérialisés par des étiquettes blanches. Nous supposons que le fournisseur est en mesure de nous livrer immédiatement en référence 3 mais pas en 1. On enregistre donc l'arrivée de 2 nouvelles pièces brutes pour la référence 3 (deux étiquettes grises) ainsi que le retour de 2 autorisations au poste 2, le total pour la référence 3 retourne donc à 6 étiquettes. On observe donc que le niveau du stock d'entrée (poste 3) est passé à 7 pièces. En effet, contrairement au cas monoproduit, la valeur maximale dans le cas multiproduit n'est pas la valeur initiale de 5 lots mais 11 lots. Dans cette configuration on aura 11 pièces brutes en entrée (étiquettes grises), assorties de 6 ordres de fabrications (étiquettes blanches). Pendant ce temps, 2 références 1 ont été construites et placées dans le stock de produits finis (4) en attendant que la commande soit complète. Deux autorisations de production retournent donc au tableau 1 d'où elles repartent immédiatement en éliminant deux des demandes en retard (étiquettes blanches). On a donc maintenant trois étiquettes blanches en attente en entrée de l'usine (poste 3) ainsi que deux étiquettes blanches au poste 2, c'est à dire la situation de la figure 45.

5.2.4.b. Implantation physique dans l'entreprise

Du point de vue matériel, on peut physiquement matérialiser les étiquettes comme c'est le cas dans beaucoup d'entreprises utilisant le kanban ou alors les dématérialiser et laisser un système informatique gérer le fonctionnement. Dans la première hypothèse, la difficulté est que contrairement au kanban, les étiquettes et les pièces sont découplées. De plus certains échanges ont lieu avec d'autres entreprises et une bonne gestion des kanbans suppose que les autres entreprises collaborent et utilisent le même système. On a donc deux cas pour une utilisation matérielle des étiquettes. Dans le cas où les autres entreprises sont liées au sein d'une entreprise virtuelle, on peut fonctionner suivant le schéma exposé par la figure 46.

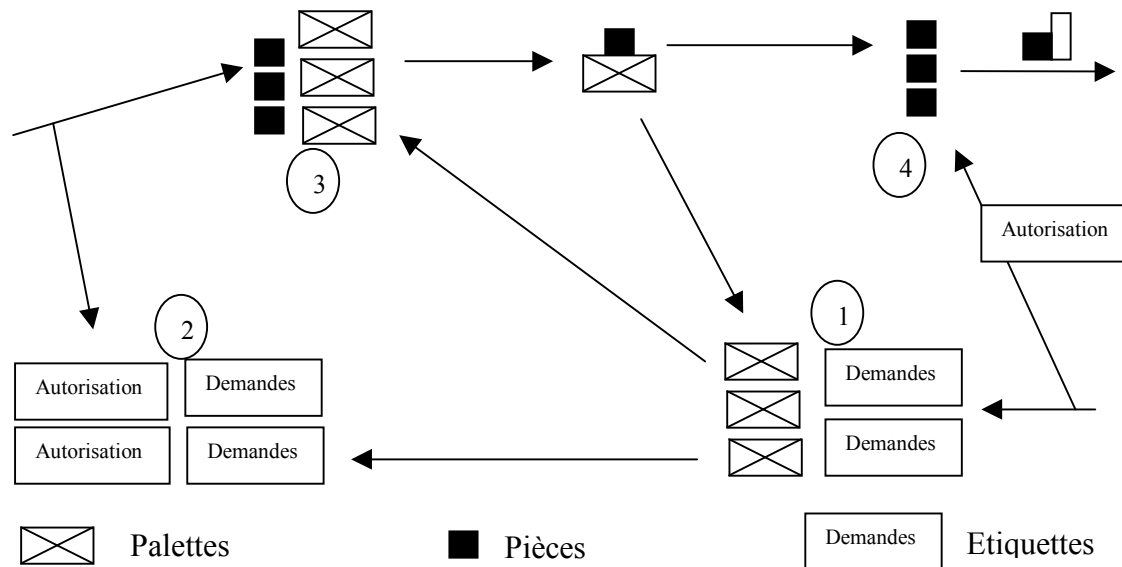


Figure 46 : Le kanban généralisé

La demande émanant de notre client est donc physiquement représentée par deux étiquettes. L'une va au stock de sortie (4) ou elle s'empile dans un véritable tableau qui permet donc de visualiser un éventuel retard sur une référence. L'autre va dans un deuxième tableau qui est associé à des palettes en attente (1). Si nous possédons les produits finis correspondants à la demande, nous renvoyons un lot de produits finis et l'étiquette associée au client. Nous supposons que les lots sont transportés et usinés à l'aide d'un support comme une palette. Nous avons donc un stock de palettes associé aux différentes références et si une demande vient du client, l'étiquette remonte vers le tableau 2 et les palettes vont au niveau du stock d'entrée 3. Dans le tableau 3, des étiquettes qui sont des autorisations de commande au fournisseur sont également rangées (c'est le même type que ce que nous avons rendu à notre client précédemment). Ainsi, si des palettes trouvent des pièces brutes au niveau de 3, elles partent en usinage et seront rendues à la fin alors que les lots iront dans le stock de produits finis (1). De leur côté, si les demandes trouvent des autorisations dans le tableau 2, elles génèrent une commande au fournisseur et sont toutes deux expédiées. Le fournisseur en retour nous livre des pièces brutes qui vont en entrée (3) à la recherche de palettes libres, et des autorisations qui retournent donc dans le tableau 2.

Maintenant, dans le cas où ne pouvons pas physiquement échanger des étiquettes avec nos partenaires, il nous appartient de les créer lorsque nous recevons une commande (mais il est alors inutile d'envoyer une étiquette au client) et lorsque nous recevons des pièces brutes. De même, nous faisons simplement une commande classique à notre fournisseur sans lui envoyer de kanbans.

Une deuxième hypothèse est de dématérialiser les kanbans et de juste garder les tableaux de bord sur une console, un programme se chargeant du reste. En effet, la plupart des entreprises utilisent des logiciels pour surveiller les mouvements de stock, les approvisionnement et les commandes. Il suffit donc de rajouter un petit programme gérant les kanbans de manière transparente. Nous avons implémenté ce mode de gestion informatisé des étiquettes sur une simple feuille Excel pour en faire la démonstration. En signalant au système lorsque nous recevons une demande du client ou lorsque nous prélevons des pièces de nos stocks, les tableaux sont automatiquement mis à jour et permettent donc de prendre les décisions de production.

5.3. Gestion du réseau par un système « hub »

Au cours d'exposés industriels présentés au groupe Vendôme¹⁶, nous avons appris que les entreprises se tournent de plus en plus vers un système baptisé « hub » qui centralise l'information et la rend disponible pour tous les sites simultanément. En particulier, cela permet de rendre accessible l'information sur le client à des parties très en amont du réseau qui sont généralement déconnectées du client. Dans cette partie, nous proposons de modéliser ce fonctionnement par du kanban étendu et appliquons cette gestion à notre modèle typique. Avant tout, nous commençons par rapidement présenter le kanban étendu.

5.3.1. Préliminaire : Présentation du kanban étendu

Le kanban étendu est une politique au croisement du base stock et du kanban développée par Dallery et Liberopoulos [DAL 00]. Comme dans le kanban, un système d'étiquettes contrôle le niveau de l'encours et comme dans le base stock, les demandes du client final sont transmises simultanément à tous les postes. Ce mécanisme est illustré par la figure 47. Sur cette figure, on observe qu'au niveau des synchronisations du kanban « classique » ont rajoute la demande du client final. Ainsi, si le nombre de kanbans tend vers l'infini, cette politique est équivalente au base-stock.

¹⁶ Groupe de travail national autour des problématiques liées aux chaînes logistiques.

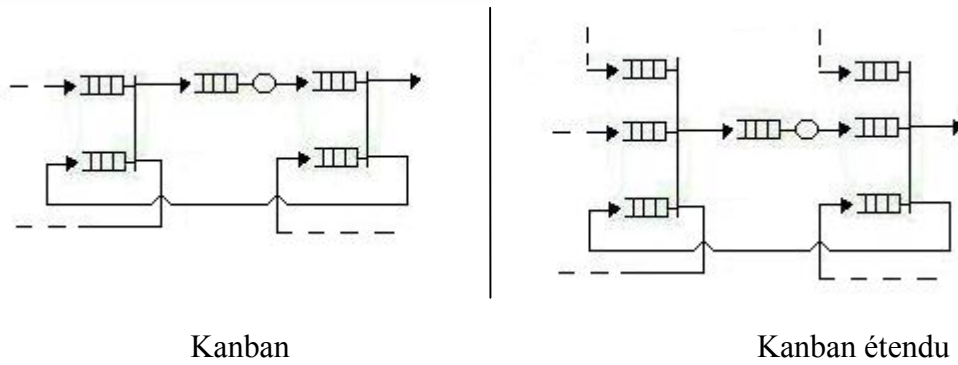


Figure 47 : Mailles en kanban et kanban étendu

5.3.2. Système « hub » et kanban étendu

L'intérêt d'un hub pour le partage de l'information est de rendre disponible à tous les sites des informations qui auparavant ne remontaient pas jusqu'à eux. En effet, dans le cas des gestions par kanban et kanban généralisé, l'information remonte de site en site comme le montre la figure 48. Les flux de matières sont en continu, les flux d'information sont en pointillés.

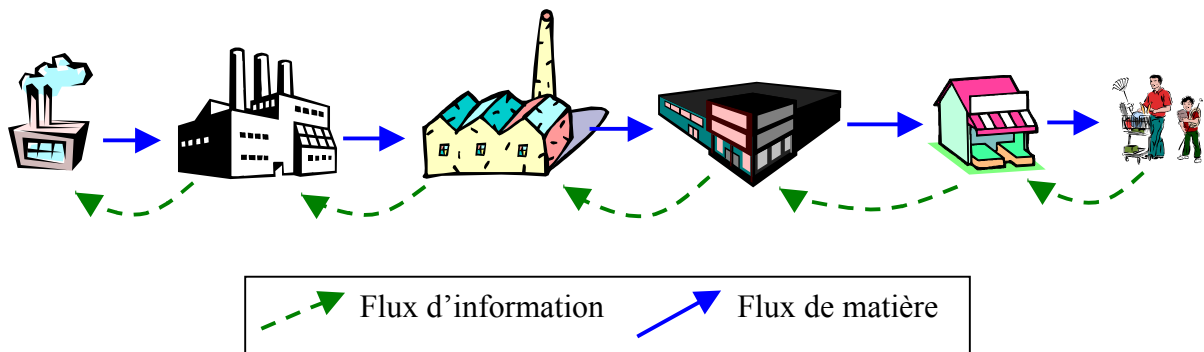


Figure 48 : Remontée de l'information de site en site

Ainsi chaque site a une relation client/ fournisseur avec ses voisins mais il n'a pas accès aux informations concernant les autres sites et surtout la demande réelle du client. Pour le hub, nous voulons donc un système où tous les sites sont avertis simultanément comme le montre la figure 49.

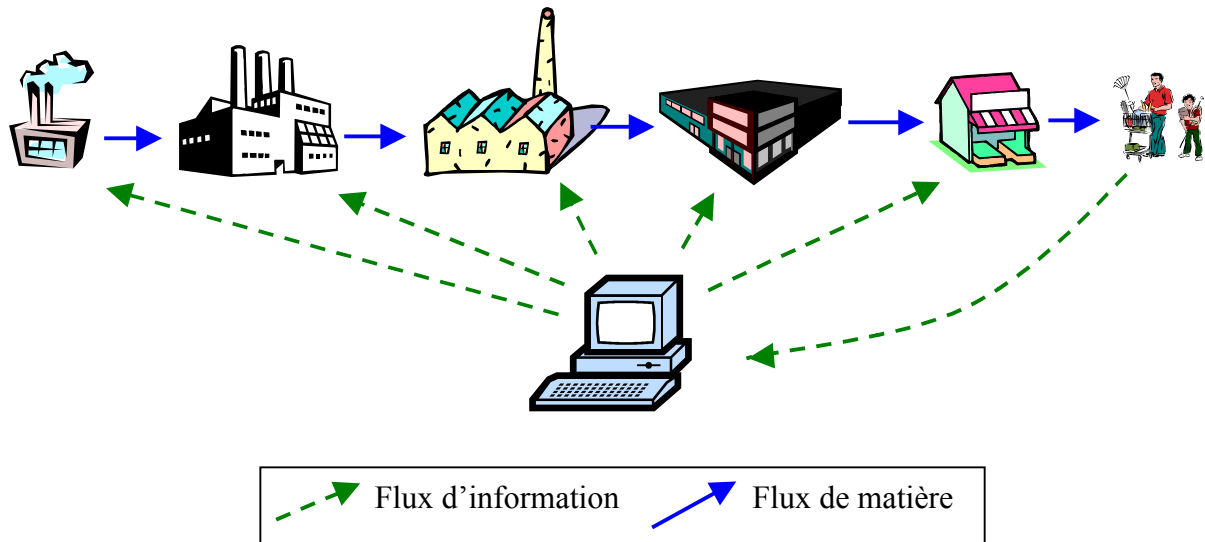


Figure 49 : Centralisation de l'information dans un hub

Ce type de fonctionnement fait immédiatement penser au base-stock mais nous avons déjà vu que l'inconvénient de cette politique de gestion est que l'encours n'est pas borné, supposant donc que les capacités de stockage des usines sont infinies. Nous choisissons donc plutôt le kanban étendu pour prendre en compte les capacités finies. Comme le montre la figure 50, nous obtenons une politique qui n'utilise plus un processus de remontée pas à pas de l'information et qui garde un contrôle de l'encours.

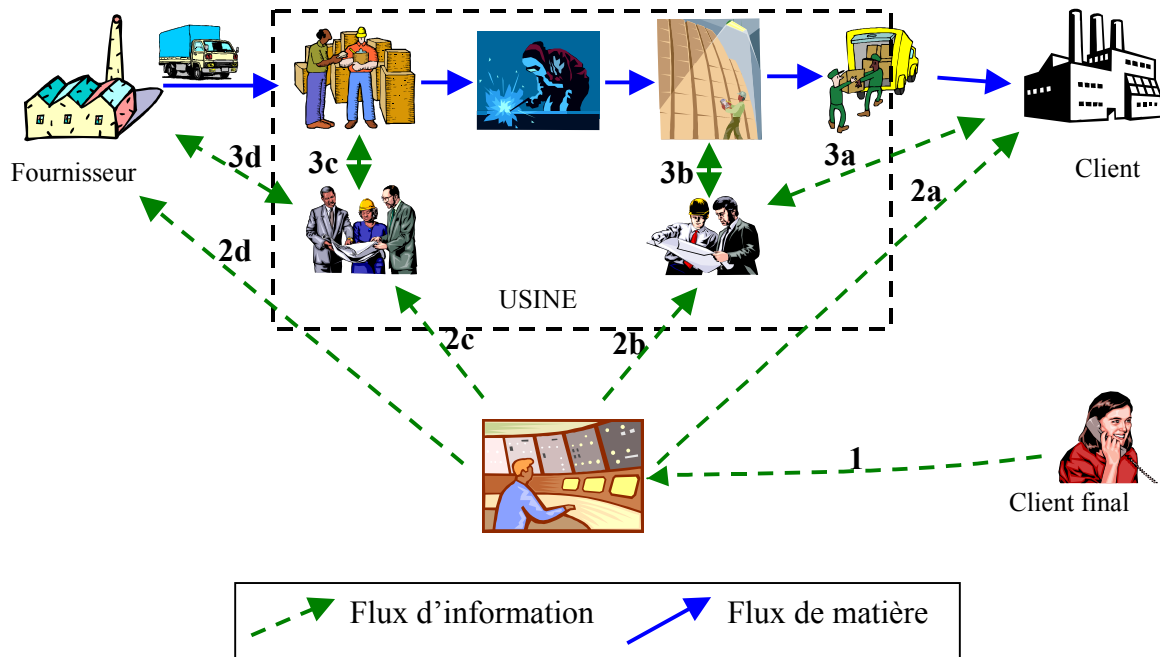


Figure 50 : Fonctionnement avec un hub

Le fonctionnement est le suivant : Lorsque le client final passe une commande (1) sa demande est transmise à tous les acteurs du réseau sans conditions particulières (2). Au niveau de chaque entreprise, on contrôle les stocks en ne lançant des ordres de fabrication que lorsqu'on a enlevé des pièces du stock de produits finis (3b et 3c). De plus, nous sommes informés de l'état du stock d'entrée de notre client et ne le livrons que si nous savons qu'il a la capacité pour recevoir nos pièces (3a). Enfin, notre fournisseur est également informé de l'état de notre stock d'entrée et agit donc en conséquence (3d). Virtuellement, l'ensemble du réseau se comporte comme une seule entité.

Nous modifions notre modèle typique de chaîne logistique en conséquence et nous comparons la gestion par kanban étendu avec le kanban.

5.3.3. Evaluation de la gestion par kanban étendu

Les connaissances actuelles ne permettent pas d'étudier un tel système par les méthodes analytiques, nous utilisons donc Arena pour conduire cette étude. Nous allons tout d'abord comparer les deux gestions dans des conditions standards puis nous parlerons des cas où la demande est très forte ou très faible.

5.3.3.a. Comparaison entre le kanban et le kanban étendu

Dans cette expérience, pour la gestion par kanbans, nous prenons un taux de 0.16 pour la demande 1, de 0.1 pour la demande 2 et de 0.12 pour la demande 3 et nous gardons les 5 kanbans par boucles. Pour le kanban étendu nous prenons bien sûr la même demande ainsi que 7 kanbans et un niveau initial de 5 produits finis. C'est à dire qu'au début de la simulation, chaque site possède cinq lots dans son stock de produits finis et deux ordres de fabrication en entrée qui attendent une demande du client final. Nous observons le taux de service ainsi que le niveau des stocks avec les deux politiques. Nous obtenons un meilleur taux de service avec le kanban étendu (0.85 pour le client 1 et 0.99 pour les clients 2 et 3) qu'avec le kanban (0.8 pour le client 1 et 0.97 pour les clients 2 et 3). En ce qui concerne les stocks, nous reprenons la numérotation utilisée dans la figure 43 de la partie précédente pour comparer les niveaux de stock obtenus avec les deux politiques. Les résultats sont portés sur la figure 51.

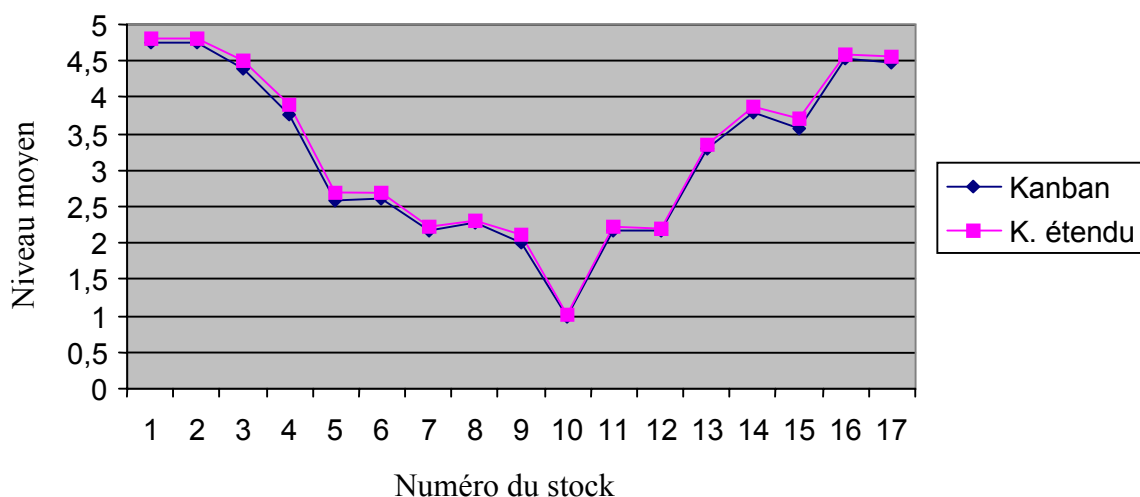


Figure 51 : Comparaison du niveau des stocks entre kanban et kanban étendu

On observe que les niveaux de stocks sont quasiment identiques. On obtient donc des résultats assez proches même si le kanban étendu améliore légèrement les performances. L'information est donc un peu accélérée par cette politique de gestion.

Le problème dans cette étude est que nous ne prenons pas en compte les phénomènes dynamiques liant les sites les uns aux autres. En effet, le principal avantage du kanban étendu est de rendre accessible la véritable demande à tous les sites. Nous évitons ainsi des problèmes que nous avons déjà évoqués de commandes surévaluées de manière à être sûr d'obtenir la quantité désirée. Nous avons vu que lorsque l'information remonte le long du réseau, les relations de défiance entre les acteurs conduisent à une modification de cette demande et à une instabilité artificielle. Cet aspect n'est pas pris en compte dans notre modélisation, ce qui nous empêche de tirer des conclusions définitives sur cette politique de gestion.

Nous allons maintenant rapidement parler du comportement du réseau lorsque la demande est faible ou élevée.

5.3.3.b. Discussion sur la modélisation

Comme nous l'avons vu au moment de la modélisation, le kanban étendu est un mélange de kanban et de base stock. On retrouve d'ailleurs l'intégralité des éléments des deux dans la modélisation. On peut ainsi remarquer que si la demande est très élevée, les arcs que nous avons rajoutés par rapport à la modélisation par kanban vont avoir tendance à être saturés donc sans effet sur les transitions. On se retrouvera donc avec une gestion équivalente au kanban. Dans le cas inverse, si la demande est très faible, c'est elle qui va être

prépondérante pour valider les synchronisations, on se retrouvera donc avec une gestion de type base stock. Ainsi le kanban étendu est équivalent au base stock lorsque la demande est faible mais plus elle augmente, plus l'influence des kanbans (qui représentent le fait que nous avons une capacité finie de stockage) se fait sentir.

Nous allons maintenant étudier l'implantation physique de cette politique de type « hub » dans un réseau.

5.3.4. Utilisation pratique du kanban étendu dans le réseau

Du point de vue des informations, on se retrouve avec trois conditions à remplir pour faire une action. Lors d'une éventuelle implantation (cas multiproduit), on aura donc trois grandeurs à prendre en compte comme le montre la figure 52. On prend en compte la capacité des stocks à travers les autorisations de production (étiquettes gris foncé), la demande du client final (étiquettes blanches) ainsi que la matière disponible pour la fabrication (étiquettes gris clair). Les étiquettes blanches sont envoyées à tous les sites simultanément alors que les étiquettes gris foncé gèrent l'encours de chaque maille. Tout comme pour le kanban généralisé, on peut totalement informatiser le fonctionnement ou utiliser des étiquettes physiques.

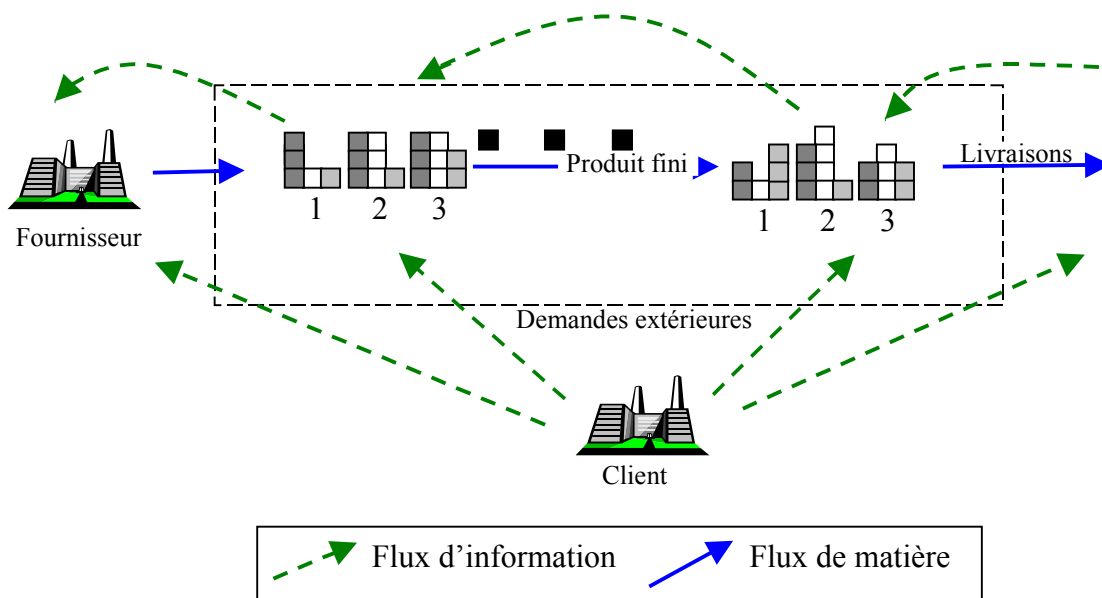


Figure 52 : Les indicateurs du kanban étendu dans le cas multiproduit

Pour la représentation physique, le kanban étendu est relativement simple puisque c'est une extension du kanban. Le problème quand on considère une relation inter-entreprise se situe encore au niveau du lien entre les sites. Comme dans le cas précédent, si les entreprises peuvent s'échanger de véritables étiquettes, on fait circuler entre les sites des autorisations qui apparaissent de manière concrète dans des tableaux. Sinon il faut au niveau du site créer une étiquette lorsqu'on reçoit une commande de l'usine aval. Par contre, à l'intérieur d'un même site, les autorisations peuvent être remplacées par le support lié à la pièce pour son usinage (s'il y en a un bien sûr). Dans la figure 53, on considère que les lots doivent être placés sur des palettes qui symbolisent les autorisations de production.

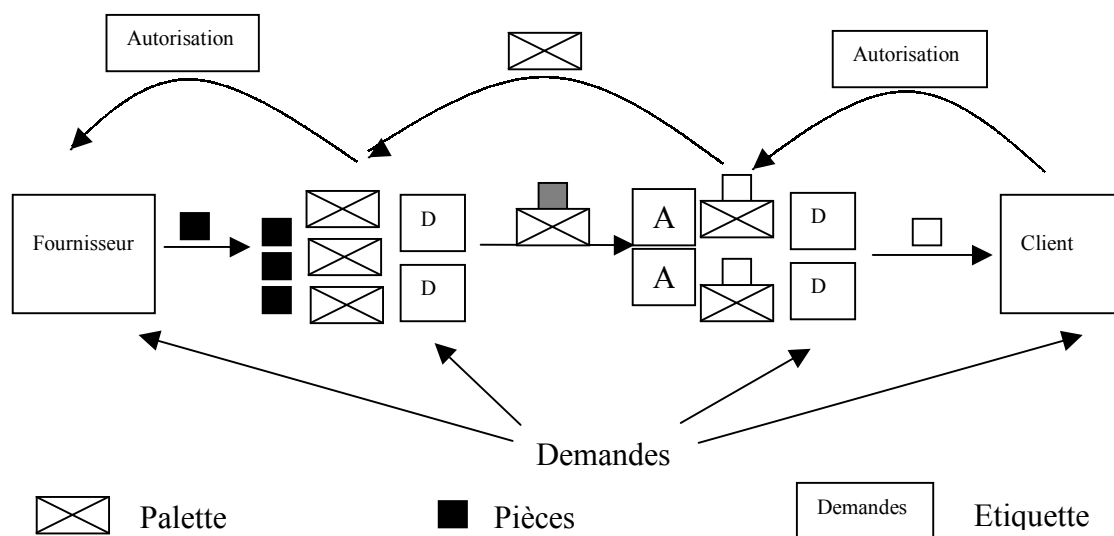


Figure 53 : le kanban étendu

Cependant, tout comme avec le kanban généralisé, on peut totalement informatiser le fonctionnement et seulement se fier au tableau de bord qui nous donne les niveaux des différents kanbans. Cette dernière solution est sans doute la plus facile à mettre en œuvre entre des sites localisés dans des endroits différents.

5.4. Synthèse sur les politiques de gestion

Dans cette partie, nous avons étudié deux politiques de gestion du réseau. L'intérêt de la première était d'accélérer la remontée des informations dans le réseau par rapport au kanban et celui de la seconde de modéliser une situation de plus en plus envisagée par les industriels.

Nous avons donc pu constater qu'effectivement la première gestion, en kanban généralisé, permettait bien d'améliorer les performances de notre réseau. Nous avons montré ses effets sur le taux de service ainsi que son impact sur les niveaux des stocks du réseau qui sont maintenus à un niveau plus élevé en dépit d'une demande forte. Nous avons ensuite expliqué comment implanter ce mécanisme dans le réseau, que ce soit de manière matérielle, un peu comme le kanban dans un atelier ou de manière informatisée.

Nous avons également proposé une modélisation pour le système « hub ». Nous avons retenu le kanban étendu plutôt que le base stock dont les encours ne sont pas bornés. Les tests pratiqués nous ont révélé des performances légèrement supérieures au kanban. Ce résultat est toutefois incomplet car notre modèle ne permet pas de prendre en compte tous les aspects « humains » de la chaîne logistique. En effet, le grand avantage du kanban étendu pour tous les acteurs du réseau et de pouvoir travailler sur des chiffres fiables évitant ainsi les suppositions hasardeuses. Tout comme pour le kanban généralisé, nous avons discuté des modalités d'implantation d'un tel système. Ce dernier est d'ailleurs plus simple à mettre en œuvre que le kanban généralisé puisqu'il repose plus largement sur le principe du kanban avec de légères modifications.

Nous allons maintenant conclure ce rapport de thèse en tirant le bilan et en étudiant les perspectives ouvertes dans la partie suivante.

« Sur l'évaluation de performances des chaînes logistiques »

Chapitre 6

Conclusions

Nunc est bibendum.

6.1. Bilan

Les objectifs de cette thèse étaient multiples. Une partie de l'étude consistait à analyser la littérature portant sur les chaînes logistiques de manière à clarifier certaines notions et à proposer un cadre d'étude permettant de classer l'énorme quantité de références sur ce sujet. A cette fin, nous avons donné une définition de la chaîne logistique telle que nous l'envisagions, c'est-à-dire comme un réseau de sites, indépendants ou pas, participant aux activités d'approvisionnement, de fabrication, de stockage et de distribution liées à la commercialisation d'un produit. Nous avons ensuite discuté du terme « chaîne logistique » employé pour en fait désigner un réseau. Cet abus de langage est cependant totalement entré dans les habitudes des scientifiques. Nous avons ensuite sommairement rappelé les origines multidisciplinaires des chaînes logistiques en nous appuyant sur l'article de Tan [TAN 01] exclusivement dédié à cette particularité du domaine. Cette confrontation de différentes communautés scientifiques est d'ailleurs une des principales causes de l'opacité du domaine. Pour pouvoir étudier la littérature portant sur les chaînes logistiques, nous avons constitué une base de données de 167 références représentant des thèmes très variés comme la coopération dans le réseau logistique, les études d'évaluation de performances, la planification, la modélisation ou encore l'effet Bullwhip. Nous avons ensuite procédé à l'analyse de cette littérature en commençant par le type d'étude : empirique ou théorique. Puis nous avons utilisé des critères comme la structure des réseaux, les paramètres et les indicateurs de performances utilisés pour construire un cadre d'étude de la littérature sur les chaînes logistiques. Nous avons finalement pu vérifier que nos critères permettaient de définir efficacement l'espace de la bibliographie en faisant apparaître des clivages parmi les références. Nous avons illustré cela sur quelques exemples comme les études sur la coopération entre les sites qui se caractérisent par leurs paramètres particuliers, leur structure binaire et des études largement théoriques. Nous avons comparé nos résultats avec ceux de Croom et al. [CRO 00] qui ont effectué une étude très proche. Cependant, cette étude vient en fait compléter la nôtre puisque ces personnes travaillent plutôt dans des secteurs du type commerce et économie. Un aspect intéressant est d'ailleurs que parmi les 167 références de notre étude, il n'y en a quasiment aucune de commune avec celles citées par Croom et al., ce qui permet d'avoir une vision tout à fait différente. Cependant, même développées dans des conditions différentes, les deux études aboutissent à des cadres dans le même esprit, s'appuyant sur le niveau d'étude ainsi que les éléments pris en compte dans le réseau.

Un objectif très important de cette analyse de la littérature était d'identifier les caractéristiques marquantes des réseaux logistiques. Nous avons retenu que les réseaux étaient arborescents, avec de l'assemblage, présentaient des niveaux clés comme les fournisseurs, les fabricants, les distributeurs et utilisaient des paramètres concernant la gestion des stocks ou les caractéristiques des sites. Nous avons également identifié les principaux indicateurs de performances comme le taux de service du client final, le coût du réseau ou le profit qu'il génère, les niveaux de stockage et le délai de fabrication.

Cette analyse de la littérature était un préliminaire indispensable à l'objectif majeur de cette thèse : montrer comment les méthodes analytiques peuvent aider à analyser une chaîne logistique et apporter des informations nécessaires lors de la création d'un nouveau réseau ou de la modification d'un réseau déjà existant. Nous avons donc conçu un modèle typique de chaîne logistique à l'aide des résultats obtenus lors de l'étude de la littérature et essayé d'analyser les effets de ses principaux paramètres. L'analyse que nous avons faite peut être considérée comme une extension à [ZIL 99b] puisque nous avons réalisé le même type d'étude mais sur un réseau plus représentatif d'une chaîne logistique, leur étude concernant seulement une chaîne linéaire. Nous avons évalué les performances de ce modèle avec une méthode analytique développée au LAG et implantée dans le logiciel Palkan. Pour cela, nous avons étudié les effets de variations du nombre de kanbans, du temps de transport, du temps d'usinage et de la demande sur le taux de service, le niveau des stocks, le temps de séjour ou encore le coût du réseau. Les tests ont été conduits en deux phases : tout d'abord l'analyse de chaque paramètre isolément, puis la variation simultanée de tous ces paramètres. Nos observations nous ont permis de dégager des principes utiles à la prise de décision stratégiques ou tactiques au moment de concevoir ou modifier une chaîne logistique. Par exemple, le nombre de kanbans par boucle a une influence primordiale sur le niveau des stocks de cette boucle. Un dysfonctionnement au niveau d'un site ou d'une liaison entre sites provoque une dégradation des performances de toute la partie du réseau située en aval. De plus, les dysfonctionnements en amont du réseau ont plus de chance de ne pas être perçus par le client que des dysfonctionnements proches de ce dernier. Enfin, une modification de la chaîne logistique de manière locale peut entraîner des conséquences pour la globalité du réseau. Nous avons donc contribué à éclaircir le domaine des chaînes logistiques et à montrer l'utilité des méthodes analytiques pour l'évaluation de performance de toute chaîne logistique.

Un dernier objectif de cette thèse a naturellement été de chercher des pistes d'améliorations de la méthode de résolution. Nous avons donc évalué la perte d'information due à la modélisation sous Palkan des transports. Pour cela, nous avons commencé par étudier

les pratiques industrielles de transports par route, mer, rail et fleuve. Nous avons répertorié les différentes organisations liées à ces modes de transports pour aboutir finalement à quatre types : le transport direct, le transport avec regroupement, le transport par une ligne régulière et les possibilités d'externalisation du stock même si ce dernier cas est un peu particulier. Nous avons proposé une modélisation pour chacun de ces modes et les avons testées avec le simulateur Arena sur un exemple inspiré de l'industrie. Nous avons ensuite comparé la modélisation fine d'Arena avec celle que nous utilisons avec Palkan. Les résultats ont permis de vérifier que le passage à la modélisation de type Palkan provoquait la perte de nombreuses informations. En particulier dans notre cas, les deux études donnent des lieux d'implantation différents pour les usines, ce qui prouve bien, dans ce cas là, l'intérêt d'une modélisation plus fine.

Nous avons également étudié deux autres politiques de gestion du réseau que le kanban. Concernant la recherche d'une politique plus efficace que celle que nous avons utilisée, nous avons pu constater que le kanban généralisé permettait d'améliorer les performances de notre réseau. Nous avons montré ses effets sur le taux de service ainsi que son impact sur les niveaux des stocks du réseau qui sont maintenus à un niveau plus élevé en dépit d'une demande forte. Nous avons ensuite expliqué comment implanter ce mécanisme dans le réseau, que ce soit de manière matérielle, un peu comme le kanban dans un atelier ou de manière informatisée. En ce qui concerne la modélisation des diverses politiques employées dans l'industrie, nous avons proposé une modélisation pour une gestion de l'information par un « hub » centralisant les informations avant de les redistribuer dans le système. Pour cela, nous avons retenu le kanban étendu plutôt que le base stock dont les encours ne sont pas bornés. Les résultats que nous avons obtenus nous poussent plutôt à continuer à chercher comment modéliser cette politique car il semble que le kanban étendu ne prenne pas exactement en compte les mêmes notions.

6.2. Perspectives

Comme nous venons de le dire dans le bilan, la méthode que nous avons utilisée pour illustrer l'intérêt des méthodes analytiques a montré des limites concernant la modélisation et nous avons donc commencé à évaluer des perspectives de développement pour cette méthode. Une perspective de développement intéressante pour les procédures de résolution analytiques en général concerne les transports mais les problèmes pour mettre en œuvre cette modélisation fine avec les méthodes analytiques concernent principalement la gestion de la

taille des lots, ce qui place ce problème en tête des perspectives de développement. Des modes de transport comme les lignes régulières ont également fait apparaître des problèmes liés aux synchronisations temporisées. Cependant, cette perspective semble plus difficile à mettre en œuvre rapidement dans une méthode analytique car de nombreuses difficultés secondaires viennent se greffer sur le problème principal au fur et à mesure de sa résolution.

Une autre perspective de développement pour les méthodes analytiques concerne la prise en compte de politiques de gestion diverses ou la recherche d'une politique plus efficace que celles utilisées à l'heure actuelle. Les résultats que nous avons obtenus nous poussent à continuer à chercher comment modéliser la politique de type « hub » car il semble que le kanban étendu ne représente pas fidèlement toutes les notions liées à cette politique.

Ces deux perspectives de recherche permettront de rendre les méthodes analytiques encore plus performantes pour l'évaluation de performance des chaînes logistiques en élargissant le nombre de configurations.

Références bibliographiques

- [AGR 00] Agrawal V., Seshadri S., « Risk Intermediation in Supply Chains », *IIE Transactions*, n° 32, pp. 819-831, 2000.
- [AKK 03] Akkermans H.A., Bogerd P., Yücesan E. et van Wassenhove L., « The impact of ERP on supply chain management: Exploratory findings from a European Delphi study », *European Journal of Operational Research*, n° 146, pp. 284-301, 2003.
- [ALD 03] Aldin N. et Stahre F., « Electronic commerce, marketing channels and logistics platforms – a wholesaler perspective », *European Journal of Operational Research*, n° 144, pp. 270-279, 2003.
- [AND 99] Anderson E.G. et Morrice D.J., « A Simulation Model to Study the Dynamics in a Service-Oriented Supply Chain », Actes de la *99 Winter Simulation Conference*, pp. 742-748, 1999.
- [ARN 95] Arntzen B.C., Brown G.G., Harrison T.P., Trafton L.L., « Global Supply Chain Management at Digital Equipment Corporation », *Interfaces*, vol. 25, n° 1, pp. 69-93, 1995.
- [ARC 99] Archibald G., Karabakal N., Karlsson P., « Supply chain vs supply chain : Using simulation to compete beyond the four walls », Actes de la *99 Winter Simulation Conference* pp. 1207-1214, 1999.
- [AVI 01] Aviv Y., « The effect of collaborative forecasting on supply chain performance », *Management Science*, vol. 47, n° 10, pp. 1326-1343, 2001.
- [AXS 01] Axsäter S., « A framework for decentralized multi-echelon inventory control », *IIE Transactions*, n° 33, pp. 91-97, 2001.
- [AXS 03] Axsäter S., « Optimal policies for serial inventory systems under fill rate constraints », *Management Science*, vol. 49, n° 2, pp. 247-253, 2003.
- [BAG 98] Baganha M.P., Cohen M.A., « The Stabilizing Effect of Inventory in Supply Chains », *Operations Research*, vol. 46, n° 3, pp. s72-s83, 1998.
- [BAI 00] Baiman S., Fisher P.E. et Rajan M.V., « Information, contracting, and quality costs », *Management Science*, vol. 46, n° 6, pp. 776-789, 2000.
- [BAI 01] Baiman S., Fisher P.E. et Rajan M.V., « Performance measurement and design in supply chains », *Management Science*, vol. 47, n° 1, pp. 173-188, 2001.
- [BAU 01] Bause F., Fisher M., Kemper P., Volker M., « Performance and Cost Analysis of Supply Chain Models », Actes de *Seoul Sim 2001 Conference*, Seoul, pp. 425-434, 2001.

[BAY 01] Baynat B., Dallery Y., Di Mascolo M., Frein Y., « A Multi-Class Approximation Technique for the Analysis of Kanban-Like Control Systems », *International Journal of Production Research*, vol. 39, n° 2, pp. 307-328, 2001.

[BAY 02] Baynat B., Buzacott J.A. et Dallery Y., « Multi-product Kanban-like control systems », *International Journal of Production Research*, décembre 2002.

[BEA 01] Beamon B.M., Chen V.C.P., « Performance Analysis of Conjoined Supply Chain », *International Journal of Production Research*, vol. 39, n° 14, pp. 3195-3218, 2001.

[BER 99] Bertazzi L. et Speranza M. G., « Minimizing Logistic Costs in multistage supply chains », *Naval Research Logistics*, vol. 46, pp 399-417, 1999.

[BER 02] Berning G., Brandenburg M., Gürsoy K., Mehta V. et Tölle F.J., « An integrated system solution for supply chain optimization in the chemical process industry », *OR Spectrum* n° 24, pp. 371-401, 2002.

[BHA 00] Bhattacharjee S. et Ramesh R. « A multi-period profit maximizing model for retail supply chain management: An integration of demand and supply-side mechanisms », *European Journal of Operational Research*, n° 122, pp. 584-601, 2000.

[BOU 03] Boucherie R.J., Chao X. et Miyazawa M., « Arrival first queueing networks with applications in kanban production systems », *Performance Evaluation*, n° 51, pp. 83-102, 2003.

[BRI 02] Brito de M.P., Flapper S.D.P. et Dekker R., « Reverse logistics : a review of case studies », Economic Institute Report EI 2002-21, 2002.
<http://www.eur.nl/WebDOC/doc/econometrie/feweco20020605160859.pdf>

[BUZ 89] Buzacott J.A. « Queuing models of kanban and MRP controlled manufacturing systems », *Engineering Cost and Production Economics*, n° 17, pp. 3-20, 1989.

[CAC 00] Cachon G.P. et Fisher M., « Supply chain inventory management and the value of shared information », *Management Science*, vol. 46, n° 8, pp. 1032-1048, 2000.

[CAC 01a] Cachon G.P., « Exact Evaluation of Batch-Ordering Inventory Policies in Two-Echelon Supply Chains with Periodic Review », *Operations research*, vol. 49, n° 1, pp. 79-98, 2001.

[CAC 01b] Cachon G.P., « Stock wars : Inventory competition in a two echelon supply chain with multiple retailers », *Operations research*, vol. 49, n° 5, pp. 658-674, 2001.

[CAC 01c] Cachon G.P. et Lariviere M.A., « Contracting to assure supply: How to share demand forecasts in a supply chain », *Management Science*, vol. 47, n° 5, pp. 629-646, 2001.

[CAM 97] Camm J.D., Chorman T.E., Dill F.A., Evans J.R., Sweeney D.J., Wegryn G.W., « Blending OR/MS, Judgment and GIS : Restructuring P&G's Supply Chain », *Interfaces*, vol. 27, n° 1, pp. 128-142, 1997.

[CAR 00] Carlsson C., Fullér R., « A Fuzzy Approach to the Bullwhip Effect », Actes de *Cybernetics and Systems '2000*, Vienne, pp. 228-233, 2000.

[CHE 99] Chen F., Drezner Z., Ryan J.K., Simchi-Levi D., « The Bullwhip Effect: Managerial Insights on the Impact of Forecasting and Information on Variability in a Supply Chain », Extrait de l'ouvrage *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Tayur S., Ganeshan R., Magazine M. (ed), Kluwer Academic, pp. 417-440, 1999.

[CHE 01a] Chen F., Federgruen A. et Zheng Y.S., « Coordination mechanisms for a distribution system with one supplier and multiple retailers », *Management Science*, vol. 47, n° 5, pp. 693-708, 2001.

[CHE 01b] Chen F., Federgruen A. et Zheng Y.S., « Near optimal pricing and replenishment strategies for a retail/distribution system », *Operations Research*, vol. 49, n° 6, pp. 839-853, 2001.

[CHE 01c] Chen Z.L., Hall N.G., « Supply chain scheduling: Assembly systems », Rapport de recherche, Department of Systems Engineering, Université de Pennsylvanie, 2001.
<http://citeseer.nj.nec.com/cache/papers/cs/20472/http:zSzzSzwww.seas.upenn.edu:8080zSz~zIchenzSzpaperszSzassem-12-27.pdf/supply-chain-scheduling-assembly.pdf>

[CHE 02a] Cheung K.L. et Lee H.L., « The inventory benefit of shipment coordination and stock rebalancing in a supply chain », *Management Science*, vol. 48, n° 2, pp. 300-306, 2002.

[CHE 02b] Cheyroux L. et Di Mascolo M., « Caractéristiques d'un Réseau Logistique : Une Etude Bibliographique », Actes de *CIFA 2002*, Nantes, 2002.

[CHE 02c] Cheyroux L. et Di Mascolo M., « Effects of Key Parameter Variation on a Generic Supply Network », *I.A.R. 17th annual meeting 02*, Grenoble, 2002.

[CHE 03a] Cheyroux L. et Di Mascolo M., « Caractéristiques des chaînes logistiques dans la littérature », A paraître dans le *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 2003.

[CHE 03b] Cheyroux L. et Di Mascolo M., « Modelling the transport organisation in a supply relation : a case study », *I.A.R. 18th annual meeting 03*, Duisburg, 2003.

[CHI 03] Chiang W.K., Chhajed D. et Hess J.D., « Direct marketing, indirect profits: a strategic analysis of dual-channel supply chain design », *Management Science*, vol. 49, n° 1, pp. 1-20, 2003.

[CHU 01] Chung C.S., Flynn J. et Stalinski P., « A single period inventory placement problem for a serial supply chain », *Naval Research Logistics*, vol. 48, pp. 506-517, 2001.

[CLA 60] Clark A., Scarf H., « Optimal policies for a multi-echelon inventory problem », *Management Science*, n° 6, pp. 465-490, 1960.

[CLA 01] Clark T.H., Croson D.C. et Schiano W.T., « A Hierarchical Model of Supply-Chain Integration: Information Sharing and Operational Interdependence in the US Grocery Channel », *Information Technology and Management*, n° 2, pp. 261-288, 2001.

[COH 88] Cohen M.A., Lee H.L., « Strategic Analysis of Integrated Production-Distribution Systems: Models and Methods », *Operations Research*, vol. 36, n° 2, pp. 216-228, 1988.

[COH 01] Cohen M. et Stathis K., « Strategic change stemming from e-commerce : implications of multiagent systems on the supply chain », *Strategic Change*, n° 10, pp. 139-149, 2001.

[COR 01a] Corbett C., « Stochastic inventory systems in a supply chain with asymmetric information: Cycle stocks, safety stocks and consignment stock », *Operations Research*, vol. 49, n° 4, pp. 487-500, 2001.

[COR 01b] Corbett J.C. et DeCroix G.A., « Shared-savings contracts for indirect materials in supply chains: Channel profits and environmental Impacts », *Management Science*, vol. 47, n° 7, pp. 881-893, 2001.

[COR 01c] Corbett J.C. et Karmarkar U.S., « Competition and structure in serial supply chain with deterministic demand », *Management Science*, vol. 47, n° 7, pp. 966-978, 2001.

[CRO 00] Croom S., Romano P. et Giannakis M., « Supply chain management: an analytical framework for critical literature review », *European Journal of Purchasing & Supply Management*, vol. 6, n° 1, pp. 67-83, 2000.

[DAL 00] Dallery Y. et Liberopoulos G., « Extended kanban control system : combining kanban and base stock », *IIE Transactions*, n° 32, pp. 369-386, 2000.

[DAV 02] David J.S., Hwang Y., Pei B.K.W. et Reneau J.H., « The performance effects of congruence between product competitive strategies and purchasing management design », *Management Science*, vol. 48, n° 7, pp. 866-885, 2002.

[DEA 94] de Araujo S.L., « Sur l'analyse et le dimensionnement de systèmes de production gérés en kanban », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1994.

[DEJ 03] Dejonckheere J., Disney S.M., Lambrecht M.R. et Towill D.R. « Measuring and avoiding the bullwhip effect: a control theoretic approach », *European Journal of Operational Research*, n° 147, pp. 567-590, 2003.

[DEL 01] van Delft C. et Vial J.P., « Quantitative analysis of multi-periodic supply chain contracts with options via stochastic programming », Cahier de recherche du groupe HEC, n° 733, 2001.

[DIM 93] Di Mascolo M. « Analysis of a synchronization station for the performance evaluation of a kanban system with a general arrival process of demands », Rapport de recherche du LAG n° 93.187, 1993.

[DIM 95] Di Mascolo M., Furmans K., Kunze O., « Modeling a Kanban Controlled Supply Relation: A Case Study », *I.A.R. Annual Meeting*, Grenoble, Novembre 1995.

[DUR 97] Duri C., Di Mascolo M., Frein Y. et Hodac A., « Sur l'intérêt de la gestion kanban généralisé », *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 31, n° 8, pp. 1311-1337, 1997.

- [DUR 00] Duri C., Frein Y. et Di Mascolo M., « Comparing among three pull control policies : kanban, base stock, and generalized kanban », *Annals of Operations Research*, n° 93, pp. 41-69, 2000.
- [ERN 00] Ernst R. et Kamrad B. « Evaluation of supply chain structures through modularization and postponement », *European Journal of Operational Research*, n° 124, pp. 495-510, 2000.
- [ERT 02] Ertek G. et Griffin P.M. « Supplier and buyer driven channels in a two stage supply chain », *IIE Transactions*, n° 34, pp. 691-700, 2002.
- [ETT 00] Ettl M., Feigin G.E., Lin G.Y., Yao D.D., « A Supply Network Model with Base-Stock Control and Service Requirements », *Operations Research*, vol. 48, n° 2, pp. 216-232, 2000.
- [FEI 99] Feigin G.E., « Inventory Planning in Large Assembly Supply Chains » Extrait de l'ouvrage *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Tayur S., Ganeshan R., Magazine M. (ed), Kluwer Academic, pp. 761-787, 1999.
- [FLE 01] Fleischmann M. « Reverse logistics network structure and design », Rapport de recherche ERS-2001-52-LIS (soumis pour publication), 2001.
<http://www.eur.nl/WebDOC/doc/erim/erimrs20010919163815.pdf>
- [FOX 00] Fox M.S., Barbuceanu M. et Teigen R. « Agent-oriented supply chain management », *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, n° 12, pp. 165-188, 2000.
- [FRE 01] Frederix F. « An extended enterprise planning methodology for the discrete manufacturing industry », *European Journal of Operational Research*, n° 129, pp. 317-325, 2001.
- [GAN 99] Ganeshan R., Jack E., Magazine M.J., Stephens P., « A Taxonomic Review of Supply Chain Management Research », Extrait de l'ouvrage *Quantitative Models for Supply Chain Management* Tayur S., Ganeshan R., Magazine M. (ed), Kluwer Academic, pp. 841-880, 1999.
- [GAR 02] Garcia-Flores R. et Wang X.Z. « A multi agent system for chemical supply chain simulation and management support », *OR Spectrum*, n° 24, pp. 343-370, 2002.
- [GAU 00] Gaucher S., Hovelaque V. et Soler L-G. « Coordination entre producteurs et maîtrise des aléas de demande », *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, n° 57, 2000.
- [GAV 99] Gavirneni S., Kapuscinski R. et Tayur S., « Value of Information in Capacitated Supply Chains », *Management Science*, n° 45, pp.16-24, 1999.
- [GAV 02] Gavirneni S., « Information flows in capacitated supply chains with fixed ordering costs », *Management Science*, vol. 48, n° 5, pp. 644-651, 2002.

[GJE 02] Gjerdrum J., Shah N. et Papageorgiou L.G. « Fair transfert price and inventory holding policies in two-enterprise supply chains », *European Journal of Operational Research*, n° 143, pp. 582-599, 2002.

[GOE 02] Goetschalckx M., Vidal C.J. et Dogan K. « Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms », *European Journal of Operational Research*, n° 143, pp. 1-18, 2002.

[GOR 67] Gordon W.J., Newell G.F. « Closed queueing networks with exponential servers », *Operations Research*, n° 15, pp. 252-267, 1967.

[GRA 96] Graves S.C. et Willems S.P., « Strategic Safety Stock Placement in Supply Chains », Actes de *MSOM Conference 1996*, Dartmouth College, Hanover NH, pp. 299-304, 1996.

[GRA 98] Graves S.C., Kletter D.B., Hetzel W.B., « A Dynamic Model for Requirements Planning with Application to Supply Chain Optimization », *Operations Research*, vol. 46, n° 3, pp s35-s49, 1998.

[GRA 01] Grahovac J. et Chakravarty A., « Sharing and lateral transshipment of inventory in a supply chain with expensive low-demand items », *Management Science*, vol. 47, n° 4, pp. 579-594, 2001.

[GRI 03] Grieger M. « Electronic marketplaces: A literature review and a call for supply chain management research », *European Journal of Operational Research*, n° 144, pp. 280-294, 2003.

[HAE 02] Haehling von Lanzener C. et Pilz-Glombik K. « Coordinating supply chain decisions : an optimisation model », *OR Spectrum*, n° 24, pp. 59-78, 2002.

[HEL 99] Helber S., « Supply Chain Management : Make or Buy Decision making », Actes de *Second Aegean International Conference on Analysis and Modelling of Manufacturing Systems*, pp. 311-320, 1999.

[HOM 00] Homburg C., Schneeweiss C., « Negotiations within Supply Chains », *Computational & Mathematical Organisation Theory*, n° 6, pp. 47-59, 2000.

[JAI 99] Jain S., Lim C.C., Gan B.P., Low Y.H., « Criticality of Detailed Modeling in Semiconductor Supply Chain Simulation », Actes de *99 Winter Simulation Conference*, pp. 888-896, 1999.

[JAI 01] Jain N. et Paul A., « A generalized model of operations reversal for fashion goods », *Management Science*, vol. 47, n° 4, pp. 595-600, 2001.

[JAN 01] Jansen D.R., van Weert A., Beulens A.J.M. et Huirne R.B.M. « Simulation model of multi-compartment distribution in the catering supply chain », *European Journal of Operational Research*, n° 133, pp. 210-224, 2001.

- [JEL 01] Jellouli O., Chatelet E., Lallement P., « Optimizing Supply Chain Inventory Management by Use of Monte Carlo Simulation and Meta-Heuristic Methods », Rapport de Recherche du LMSS, 2001.
- [JON 02] Jones A. « An environmental assessment of food supply chains : a case study on dessert apples », *Environmental Management*, vol.30, n° 4, pp 560-576, 2002.
- [KAR 02] Karaesmen F., Buzacott J.A. et Dallery Y. « Integrating advance order information in make to stock production system », *IIE Transactions*, n° 34, pp. 649-662, 2002.
- [KEE 00] Keebler J.S. « The state of logistics measurement », *Supply chain & Logistics Journal*, Spring 2000.
- [KEK 99] Kekre S., Mukhopadhyay T., Srinivasan K., « Modeling Impacts of Electronic Data Interchange Technology », Extrait de l'ouvrage *Quantitative Models for Supply Chain Management* Tayur S., Ganeshan R., Magazine M. (ed), Kluwer Academic, pp. 359-380, 1999.
- [KES 01] Keskinocak P., Tayur S., « Quantitative Analysis for Internet-Enabled Supply Chains », *Interfaces*, vol. 31, n° 2, pp. 70-89, 2001.
- [KHO 02] Khouja M. et Kumar R.L. « Information technology investments and volume-flexibility in production systems », *International Journal of Production Research*, vol. 40, n° 1, pp. 205-221, 2002.
- [KIM 00] Kim B. « Coordinating an innovation in supply chain management », *European Journal of Operational Research*, n° 123, pp. 568-584, 2000.
- [KIM 02a] Kim B, Leung J.M.Y., Park K.T., Zhang G. et Lee S. « Configuring a manufacturing firm's supply network with multiple suppliers », *IIE Transactions*, n° 34, pp. 663-677, 2002.
- [KIM 02b] Kim S.W. et Narasimhan R. « Information system utilization in supply chain integration efforts », *International Journal of Production Research*, vol. 40, n° 18, pp. 4585-4609, 2002.
- [KIM 03] Kim H.K. et Ryan J.K. « The cost impact of using simple forecasting techniques in a supply chain », *Naval Research Logistics*, vol. 50, 2003.
- [KLA 02] Klastorin T.D., Moinzadeh K. et Son J. « Coordinating orders in supply chains through price discounts », *IIE Transactions*, n° 34, pp. 679-689, 2002.
- [KOK 00] Kokkinaki A.I., Dekker R., Van Nunen J., Pappis C., « An exploratory study on electronic commerce for reverse logistics » *Supply Chain Forum, An International Journal*, vol. 1, n° 1, pp. 10-17, 2000.
- [KON 00] Kongar E., Gupta S.M., « A goal programming approach to the remanufacturing supply chain model », Actes de *SPIE International Conference on Environmentally Consious Manufacturing*, vol 4193 pp.167-178, 2000.

[KOU 02] Kouvelis P. et Milner J.M. « Supply chain capacity and outsourcing decisions : the dynamic interplay of demand and supply uncertainty », *IIE transactions*, n° 34, pp. 717-728, 2002.

[LAK 01] Lakhal S., Martel A., Kettani O. et Oral M. « On the optimisation of supply chain networking decisions », *European Journal of Operational Research*, n° 129, pp. 259-270, 2001.

[LAM 01] Lambert D. M. « Supply chain Management : What does it involve ? », *Supply chain & Logistics Journal*, Fall 2001.

[LEE 93a] Lee H.L. et Billington C., « Material Management in Decentralized Supply Chains », *Operations Research*, vol 41, n° 5, pp. 835-847, 1993.

[LEE 93b] Lee H.L., Billington C., Carter B., « Hewlett-Packard Gains Control of Inventory and Service through Design for Localization », *Interfaces*, vol. 23, n° 4, pp. 1-11, 1993.

[LEE 95] Lee H.L., Billington C., « The Evolution of Supply-Chain-Management Models and Practice at Hewlett-Packard », *Interfaces*, vol. 25, n° 5, pp. 42-63, 1995.

[LEE 97a] Lee H.L., Padmanabhan V., Whang S., « Information Distortion in a Supply Chain : the Bullwhip Effect », *Management Science*, vol. 43, n° 4, pp. 546-558, 1997.

[LEE 97b] Lee H.L., Padmanabhan V., Whang S., « The Bullwhip Effect in Supply Chains », *Sloan Management Review* Spring, pp. 93-102, 1997.

[LEE 99] Lee H. et Whang S., « Decentralized multi-echelon supply chains: incentives and information », *Management Science*, vol. 45, n° 5, pp. 633-640, 1999.

[LEE 01a] Lee Y.H., « Supply Chain Model for the Semiconductor Industry of Global Market », *Journal of Systems Integration*, n° 10, pp. 189-206, 2001.

[LEE 01b] Lee C.H. « Coordinated stocking, clearance sales, and return policies for a supply chain », *European Journal of Operational Research*, n° 131, pp. 491-513, 2001.

[LEE 02] Lee H. et Whang S., « The impact of the secondary market on the supply chain », *Management Science*, vol. 48, n° 6, pp. 719-731, 2002.

[LI 02] Li L., « Information sharing in a supply chain with horizontal competition », *Management Science*, vol. 48, n° 9, pp. 1196-1212, 2002.

[LIL 00] Lillford P.J. et Howker R. « And what would you like for lunch Dr Frankenstein ? The food supply chain : past history and future visions », *Journal of the science food and agriculture*, n° 80, pp. 2165-2168, 2000.

[LIN 98] Lin F.R. et Shaw M.J., « Reengineering the Order Fulfillment Process in Supply Chain Networks », *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, n° 10, pp. 197-229, 1998.

- [LIP 01] Lippman S. « Supply chain Environmental Management », *Environmental quality management*, Winter 2001.
- [LOU 03] Lourenço H.R., « Supply chain management : an opportunity for metaheuristics », Extrait de l'ouvrage *Addaptive Memory and Evolution: Tabu Search and Scatter Search*, C. Rego et B. Alidaee (ed), Kluwer Academic, 2003.
- [MAH 01] Mahajan S. et van Ryzin G., « Inventory competition under dynamic consumer choice », *Operations Research*, vol. 49, n° 5, pp. 646-657, 2001.
- [MAR 93] Martin C.H., Dent D.C., Eckhart J.C., « Integrated Production, Distribution and Inventory Planning at Libbey-Owens-Ford », *Interfaces*, vol. 23, n° 3, pp. 68-78, 1993.
- [MET 98] Metz P.J., « Demystifying Supply Chain Management », *Winter 98 Supply Chain Management Review*, 1998.
<http://www.coba.usf.edu/departments/isds/faculty/abhata/eb/SCM-Demystifying.pdf>
- [MOI 01] Moinzadeh K. « An improved ordering policy for continuous review inventory systems with arbitrary inter-demand time distribution », *IIE Transactions*, n° 33, pp. 111-118, 2001.
- [MON 03] Mondal S. et Tiwari M.K. « Formulation of mobile agents for integration of supply chain using the KLAIM concept », *International Journal of Production Research*, vol. 41, n° 1, pp. 97-119, 2003.
- [MOS 00] Moses M., Seshadri S., « Policy Mechanisms for Supply Chain Coordination », *IIE Transactions*, n° 32, pp. 245-262, 2000.
- [MUK 03] Mukhopadhyay S.K. et Barua A.K. « Supply chain cell activities for a consumer goods company », *International Journal of Production Research*, vol. 41, n° 2, pp. 297-314, 2003.
- [MUL 99] Müller S. « Analysis of the Bullwhip Effect in a Supply Chain », Rapport de projet de fin d'étude au Laboratoire d'Automatique de Grenoble. Juin 1999.
- [MUN 01] Munson C.L. Rosenblatt M.J., « Coordinating a Three-Level Supply Chain with Quantity Discounts », *IIE Transactions*, n° 33, pp. 371-384, 2001.
- [NEU 81] Neuts M.F. « Matrix geometric solutions in stochastic models », The John Hopkins University Press, 1981.
- [NIS 00a] Nissen M. « Agent-based supply chain disintermediation versus re-intermediation : economic and technological perspectives », *International Journal of intelligent systems in accounting, finance and management*, n° 9, pp. 237-256, 2000.
- [NIS 00b] Nissen M.E. « An intelligent tool for process redesign : manufacturing supply chain applications », *The international journal of flexible manufacturing systems*, n° 12, pp. 321-339, 2000.

- [NOV 01] Novak S. et Eppinger S.D., « Sourcing by design: Product complexity and the supply chain », *Management Science*, vol. 47, n° 1, pp. 189-204, 2001.
- [OTT 03] Otto A. et Kotzab H. « Does supply chain management really pay? Six perspectives to measure the performance of managing a supply chain », *European Journal of Operational Research*, n° 144, pp. 306-320, 2003.
- [PAG 01] Pagell M. et Sheu C. « Buyer behaviours and the performance of the supply chain : an international exploration », *International Journal of Production Research*, vol. 39, n° 13, pp. 2783-2801, 2001.
- [PAR 98a] Parunak H.V.D., VanderBok R., « Modeling the Extended Supply Network », Actes de *ISA-Tech'98*, Houston, Texas, 1998.
- [PAR 98b] Parunak H.V.D. « The DASch experience: How to model a supply chain », Actes de la *Second International Conference on Complex systems*, 1998.
- [PAR 99] Parija G.R., Sarker B.R., « Operations Planning in a Supply Chain System with Fixed-Interval Deliveries of Finished Goods to Multiple Customers », *IIE Transactions*, n° 31, pp. 1075-1082, 1999.
- [PAS 00] Paschalidis I.C., Liu Y., « Large Deviations-Based Asymptotics for Inventory Control in Supply Chains », Actes de la *39th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 528-533, Sydney, Australia, 2000.
- [PON 02] Pontrandolfo P., Gosavi A., Okogbaa O.G. et Das T.K. « Global supply chain management: a reinforcement learning approach », *International Journal of Production Research*, vol. 40, n° 6, pp. 1299-1317, 2002.
- [POO 94] Pooley J., « Integrated Production and Distribution Facility Planning at Ault Foods », *Interfaces*, vol. 24, n° 4, pp. 113-121, 1994.
- [RAG 01] Raghunathan S., « Information sharing in a supply chain: A note on its value when demand is nonstationary », *Management Science*, vol. 47, n° 4, pp. 605-610, 2001.
- [RAG 03] Raghunathan S. « Impact of demand correlation on the value of and incentives for information sharing in a supply chain », *European Journal of Operational Research*, n° 146, pp. 634-649, 2003.
- [RAN 01] Randall T. et Ulrich K., « Product variety, supply chain structure, and firm performance: Analysis of the U.S. bicycle industry », *Management Science*, vol. 47, n° 12, pp. 1588-1604, 2001.
- [RAO 98] Rao U., Scheller-Wolf A., Tayur S., « Development of a Rapid Response Supply Chain at Caterpillar », *Operations Research*, vol. 48, n° 2, 1998.
- [RID 02] Riddalls C.E., Bennett S., « The stability of supply chains », *International Journal of Production Research*, vol. 40, n° 2, pp. 459-475, 2002.

[ROB 02] Robertson P.W., Gibson P.R. et Flanagan J.T. « Strategic supply chain development by integration of key global logistical process linkages », *International Journal of Production Research*, vol. 40, n° 16, pp. 4021-4040, 2002.

[ROY 89] van Roy T.J., « Multi-Level Production and Distribution Planning with Transportation Fleet Optimization », *Management Science*, vol. 35, n° 12, pp. 1443-1453, 1989.

[SAG 02] Saghir M. « Packaging information needed for evaluation in the supply chain : the case of the swedish grocery industry », *Packaging technology and science*, n° 15, pp. 37-46, 2002.

[SAU 99] Sauter J.A., Van Dyke Parunak H., « ANTS in the Supply Chain », Actes du *Workshop on Agent Based Decision Support for Managing the Internet-Enabled Supply Chain, Agents 99*, Seattle, Washington, 1999.

[SCH 98] Scheller-Wolf A., Tayur S., « A Markovian Dual-Source Production-Inventory Model with Order Bands », Rapport de recherche E200 de la Graduate School of Administration (Carnegie Mellon), 1998.
http://citeseer.nj.nec.com/cache/papers/cs/6853/ftp:zSzzSzbighurt.gsia.cmu.eduzSzditzSzgsia_researchzSz2body.pdf/scheller-wolf98markovian.pdf

[SIE 00] Siemieniuch C.E. et Sinclair M.A. « Implications of the supply chain for role definitions in concurrent engineering », *Human factors and ergonomics in manufacturing*, vol 10, n° 3, pp. 251-272, 2000.

[SIM 01] Simpson N.C., Selcuk Erenguc S., « Modeling the order picking function in supply chain systems : formulation, experimentation and insights », *Interfaces*, vol. 31, n° 2, 2001.

[SMI 00] Smith W.I. et Lockamy III A. « Target costing for supply chain management : an economic framework », *The journal of corporate accounting & finance*, Dec 2000, pp. 67-77, 2000.

[SOD 01] Sodhi M.S., « Applications and Opportunities for Operations Research in Internet-Enabled Supply Chains and Electronic Marketplaces », *Interfaces*, vol. 31, n° 2, 2001.

[SRI 01] Srinivasa Raghavan N.R., Viswanadham N., « Generalized Queueing Network Analysis of Integrated Supply Chains », *International Journal of Production Research*, vol.39 n° 2, pp. 205-224, 2001.

[SWA 97] Swaminathan J.M., Smith S.F., Sadeh N.M., « Effect of Sharing Supplier Capacity Information », Rapport de recherche du Robotics Institute (Carnegie Mellon), 1997.
http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub2/swaminathan_jayashankar_1997_1/swaminathan_jayashankar_1997_1.pdf

[SWA 98] Swaminathan J.M., Smith S.F. et Sadeh N.M., « Modeling Supply Chain Dynamics : A Multiagent Approach », *Decision Sciences*, vol. 29, n° 3, pp. 607-632, 1998.

[SZP 96] Szpiro D., Gouvernal E. et Hannape P., « Le transport de marchandises : volume, qualité et prix hédoniques », Rapport interne de l'Université de Lille, 1996.

[TAL 02] Talluri S. et Baker R.C. « A multi-phase mathematical programming approach for effective supply chain design », *European Journal of Operational Research*, n° 141, pp. 544-558, 2002.

[TAN 01] Tan K.C., « A framework of supply chain management literature » *European Journal of Purchasing & Supply Management*, vol. 7, n° 1, pp. 39-48, 2001.

[TAY 99] Tayur S., Ganeshan R. et Magazine M. « Quantitative models for supply chain management », Kluwer Academic Publishers, 1999.

[TAY 01] Taylor T.A., « Channel coordination under price protection, midlife returns, and end-of-life returns in dynamic markets », *Management Science*, vol. 47, n° 9, pp. 1220-1234, 2001.

[TAY 02] Taylor T.A., « Supply chain coordination under channel rebates with sales efforts effects », *Management Science*, vol. 48, n° 8, pp. 992-1007, 2002.

[TEI 97] Teigen R., « Information Flow in a Supply Chain Management System », Thèse de l'Université de Toronto, 1997.

[TEL 01] Telle O., Pistre T., Thierry C. et Bel G. « Relation Client / Fournisseur au sein d'une chaîne logistique intégrée : Un modèle de simulation », Actes de la 3^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation « Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels » MOSIM'01, Troyes, 2001.

[TEL 03] Telle O., Thierry C. et Bel G. « Simulation d'une relation client/fournisseur au sein d'une chaîne logistique intégrée : Mise en œuvre industrielle », Actes de la 4^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation « Organisation et Conduite d'Activités dans l'Industrie et les Services » MOSIM'03, Toulouse, 2003.

[TEM 00] Tempelmeier H. « Inventory service-levels in the customer supply chain », *OR Spectrum*, n° 22, pp. 361-380, 2000.

[THE 01] Thede A., Schmidt A. et Merz C. « Integration of goods delivery supervision into e-commerce supply chain », *WELCOM 2001*, LNCS 2232, pp. 206-218, 2001.

[THI 01] Thierry C., Telle O., Bel G., « Modèle d'Optimisation Macroscopique pour Evaluer les Performances d'un Système de Production Kanban au Sein d'une Chaîne Logistique », Actes du 4^o congrès international de Génie Industriel, Aix, France, Juin 2001.

[THO 02a] Thonemann U.W. et Bradley J.R. « The effect of product variety on supply-chain performance », *European Journal of Operational Research*, n° 143, pp. 548-569, 2002.

[THO 02b] Thonemann U.W. « Improving supply-chain performance by sharing advance demand information », *European Journal of Operational Research*, n° 142, pp. 81-107, 2002.

[THO 02c] Thoney K.A., Hodgson T.J., King R.E., Taner M.R. et Wilson A. « Satisfying due-dates in large multi-factory supply chains », *IIE Transactions*, n° 34, pp. 803-811, 2002.

[TIM 00] Timpe C.H. et Kallrath J. « Optimal planning in large multi-site production networks », *European Journal of Operational Research*, n° 126, pp. 422-435, 2000.

[TSA 99] Tsay A.A., Nahmia S., Agrawal N., « Modeling Supply Chain Contracts : a Review », Extrait de l'ouvrage *Quantitative Models for Supply Chain Management* Tayur S., Ganeshan R., Magazine M. (ed), Kluwer Academic, pp. 299-336, 1999.

[UME 98] Umeda S., Jones A., « A Simulation-Based BPR Support System for Supply Chain Management », Extrait de *Re-Engineering in Action: The Quest for World Class Excellence*, Chan Meng Khoong (ed), Imperial College Press, 1998.

[VEE 00] Veerakamolmal P., Gupta S.M., « Optimizing the supply chain in reverse logistics », Actes de *SPIE International Conference on Environmentally Conscious Manufacturing*, vol. 4193, pp.157-166, 2000.

[VID 01] Vidal C.J. et Goetschalckx M. « A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation », *European Journal of Operational Research*, n° 129, pp. 134-158, 2001.

[VIL 02] Villa A. « Emerging trends in large-scale supply chain management », *International Journal of Production Research*, vol. 40, n° 15, pp. 3487-3498, 2002.

[VIS 99] Viswanadham N., Srinivasa Raghavan N.R., « Lead Time Models for Analysis of Supply Chain Network », Actes de *Second Aegean International Conference on Analysis and Modeling of Manufacturing Systems* 1999, pp. 325-334.

[VIS 01] Viswanathan S. et Piplani R. « Coordinating supply chain inventories through common replenishment epochs », *European Journal of Operational Research*, n° 129, pp. 277-286, 2001.

[VRO 00] Vroblefski M., Ramesh R. et Zionts S. « Efficient lot-sizing under a differential transportation cost structure for serially distributed warehouses », *European Journal of Operational Research*, n° 127, pp. 574-593, 2000.

[WAL 99] Walsh W.E., Wellman M.P., « Modeling Supply Chain Formation in Multiagent Systems », Actes de *IJCAI 99 Workshop on Agent Mediated Electronic Commerce*, 1999.

[WAN 02] Wang S. et Bhaba S., « Optimal batching and shipment control in a single-stage supply chain system », Actes de la *11th Industrial Engineering and Research Conference*, Orlando, Florida, 2002.

[WEN 99] Weng Z.K., « The Power of Coordinated Decisions for Short-Life-Cycle Products in a Manufacturing and Distribution Supply Chain », *IIE Transactions*, n° 31, pp. 1037-1049, 1999.

[WHI 83] Whitt W., « The queueing network analyser », *Bell Systems Technical Journal*, n° 62, pp. 2779-2815, 1983.

[WU 98] Wu S.D. et Meixell M.J., « Relating Demand Behavior and Production Policies in the Manufacturing Supply Chain », IMSE Rapport Technique 98T-007, 1998.

<http://www.lehigh.edu/~sdw1/meixell1.PDF>

[WYC 99] Wycherley I. « Greening supply chains : the case of the body shop international », *Business strategy and the environment*, n° 8, pp. 120-127, 1999.

[YTT 99] Ytterhus B.E., Arnestad P et Lothe S. « Environmental initiatives in the retailing sector : an analysis of supply chain pressures and partnerships », *Eco-management and auditing*, n° 6, pp. 181-188, 1999.

[ZEN 99] Zeng D.D. et Sycara K., « Dynamic Supply Chain Structuring for Electronic Commerce Among Agents », extrait de *Intelligent Information Agents: Cooperative, Rational and Adaptive Information Gathering on the Internet*, Matthias Klusch (ed), Springer Verlag, 1999.

[ZHA 01] Zhao X., Xie J., Lau R.S., « Improving the supply chain performance : use of forecasting models versus early order commitments », *International Journal of Production Research*, vol.39, n° 17, pp. 3923-3939, 2001.

[ZHA 02a] Zhao X., Xie J., « Forecasting error and the value of information sharing in a supply chain », *International Journal of Production Research*, vol. 40, n° 2, pp. 311-335, 2002.

[ZHA 02b] Zhao W. et Wang Y. « Coordination of joint pricing-production decisions in a supply chain », *IIE Transactions*, n° 34, pp. 701-715, 2002.

[ZIL 99a] Zillus A. et Di Mascolo M., « Logistics Control in a Supply System. Model and Analysis », Actes de *ECC'99*, Karlsruhe, Allemagne, 1999.

[ZIL 99b] Zillus A. et Di Mascolo M., « Effects of Parameter Variation on a Supply Line », *I.A.R. annual meeting 99*, Strasbourg, France, 1999.

[ZIL 01] Zillus A., « Determination of Supply Chain Lead Time Distribution for Supply Chain with (r = 1, S) Inventory System », *I.A.R. annual meeting 01*, Strasbourg, France, 2001.

Annexes

Annexe A : Les thèmes abordés dans la littérature

	Thèmes abordés	Références concernées
Coopération	Coopération fournisseur/ usine /revendeur	[MUN 01]
	Coopération N fournisseurs/ usine	[SCH 98] [CHE 01c]
	Coopération fournisseur/revendeur	[AVI 01] [AXS 01] [CAC 01b] [COR 01a] [DEL 01] [ERT 02] [GAV 99] [GAV 02] [GJE 02] [HOM 00] [KIM 00] [MOS 00] [PAS 00] [RAG 01] [SWA 97] [WEN 99] [ZHA 02b]
	Coopération usine/ N revendeurs	[CAC 00] [CAC 01c] [CHE 01a] [CHE 01b] [KLA 02] [RAG 03] [VIS 01]
	Coopération pour gérer les invendus	[TAY 01]
	Coopération par primes	[TAY 02]
	Coopération articles périssables	[AGR 00]
	Coopération sur la réduction des consommables	[COR 01b]
	Coopération sur la qualité des pièces	[BAI 00] [BAI 01]
	Techno.	Modélisation des effets de l'EDI
Classification des niveaux d'investissements dans les technologies de l'information		[CLA 01]
Possibilités d'augmentation des informations échangées électroniquement		[THE 01]
Trans	Effet du partage d'information sur les transports	[CHE 02a]
	Optimisation du transport	[BER 99] [GRA 01] [ROY 89] [VRO 00]
Modélisation	Modélisation par agents	[FOX 00] [MON 03] [PAR 98] [SWA 98] [TEI 97]
	Modélisation par « renforcement learning »	[PON 02]
	Modélisation dans le domaine des semi conducteurs	[JAI 99] [LEE 01]
	Modélisation du reconditionnement	[SIM 01]
	Modélisation des réseaux inverses	[FLE 01]
	Modélisation d'atelier	[THI 01]
Paramètres	Analyse dynamique de paramètres	[RID 02]
	Analyse de paramètres	[BEA 01] [CAC 01a] [DAV 02] [ZIL 99b]
	Importance et détermination du temps d'attente du client	[TEM 00]
Ev	Evaluation analytique du délai dans une chaîne logistique	[ZIL 01]
	Evaluation de performance et optimisation, cas industriel	[ARN 95] [CAM 97] [LEE 93a] [LEE 93b] [LEE 95] [NIS 00b] [POO 94] [RAO 98] [ZIL 99a]
	Méthode analytique d'évaluation de performance et optimisation	[COH 88] [DIM 95] [ETT 00] [SRI 01] [VIS 99]
	Evaluation de performance et optimisation par simulation	[ARC 99] [BAU 01] [JAN 01] [UME 98] [JEL 01]

	Thèmes abordés	Références concernées
	Optimisation d'un réseau inverse	[KON 01]
	Optimisation d'un réseau logistique international	[VID 01]
Planification	Planification optimale des stocks	[CHU 01] [GRA 96] [GRA 98] [FEI 99] [FRE 01] [GAR 02] [KIM 02a] [KHO 02] [PAR 99] [ROB 02] [TIM 00] [THO 02c]
	Planification, applications industrielles	[BER 02] [MAR 93] [MUK 03]
	Détermination d'une politique optimale	[AXS 03]
	Evaluation des modèles de prédiction de la demande	[ZHA 01] [ZHA 02]
	Effets d'une méthode de prévision inefficace sur les coûts	[KIM 03]
Effet Bullwhip	Effet Bullwhip	[BAG 98] [CAR 00] [CHE 99] [DEJ 03] [LEE 97a] [LEE 97b] [WU 98]
	Réduction de la variabilité par inversion des séquences	[JAI 01]
	Effet de l'incertitude sur la politique d'approvisionnement	[KOU 02]
Int.	Utilisation d'Internet dans la chaîne logistique	[ALD 03]
	Effet d'un canal de vente par Internet	[CHI 03] [LEE 02] [ZEN 99]
S. Tr.	Décision sur la sous-traitance	[HEL 99] [LAK 01]
	Analyse du rapport complexité du produit/ sous-traitance	[NOV 01]
Environ.	Obstacles au développement de la gestion environnementale	[WYC 99]
	Rôle de l'entreprise mère dans le respect de l'environnement	[YTT 99]
	Impact du réseau d'approvisionnement sur l'environnement	[JON 02]
	Evaluation des structures logistiques	[ERN 00]
	Logiciel d'aide à la décision	[HAE 02]
	Effets de la compétition dans la chaîne logistique	[COR 01c] [LI 02] [MAH 01]
	Utilisation des demandes avancées pour améliorer les performances	[KAR 02] [THO 02a]
	Effet de l'ERP sur les chaînes logistiques	[AKK 03]
	Evaluation du niveau d'intégration du réseau	[KIM 02b]
	Méthode de construction d'un réseau logistique	[TAL 02]
	Effet de la variété des produits	[RAN 01] [THO 02b]
	Gestion de la politique commerciale du revendeur	[BHA 00]
	Organisation de la chaîne logistique	[LEE 99]
	Utilisation des agents intelligents dans le système d'information	[COH 01] [LIN 98]
	Impact de décisions locales sur l'ensemble du réseau	[PAG 01]
	Optimisation du fonctionnement d'un site	[WAN 02]
	Impact de l'emballage sur les performances	[SAG 02]
	Utilisation d'un discount pour écouler les invendus	[LEE 01b]
	Détermination du nombre de produits à retraiter pour satisfaire la demande	[VEE 00]

Annexe B : Classification de la littérature suivant notre cadre d'étude

Dans ce tableau, les 9 paramètres sont dans l'ordre : les relations entre les sites, la gestion des stocks, la demande, les caractéristiques des sites, la structure, les coûts, le transport, l'approvisionnement et les caractéristiques des produits. Les indicateurs de performance ont été regroupés en familles plus importantes pour des problèmes de visualisation, soit donc dans l'ordre : service du client, indicateurs monétaires, stocks, temps de fabrication, variabilité et enfin production. Les méthodes sont identifiées par leurs premières lettres : Théoriques Descriptives ou Normatives, Empiriques Descriptives ou Normatives et Bibliographiques. Pour les études empiriques, la structure est estimée à partir des sites pris en compte dans le champ de l'étude et notée E(.). Les études bibliographiques reposent essentiellement sur la littérature mais cela n'exclut pas qu'il y ait une petite étude théorique dans la référence. Les thèmes pris en compte sont les thèmes principaux de la partie précédente, à savoir la coopération, l'évaluation de performances, la planification, la modélisation, l'effet Bullwhip, les transports, les études de paramètres, les technologies de l'information et l'Internet. De manière à garder un nombre restreint de catégories, nous avons rangé les études non classées précédemment dans le thème qui leur était le plus proche.

Enfin les applications industrielles qui ne permettaient pas d'analyser précisément la méthode ont été classées à part.

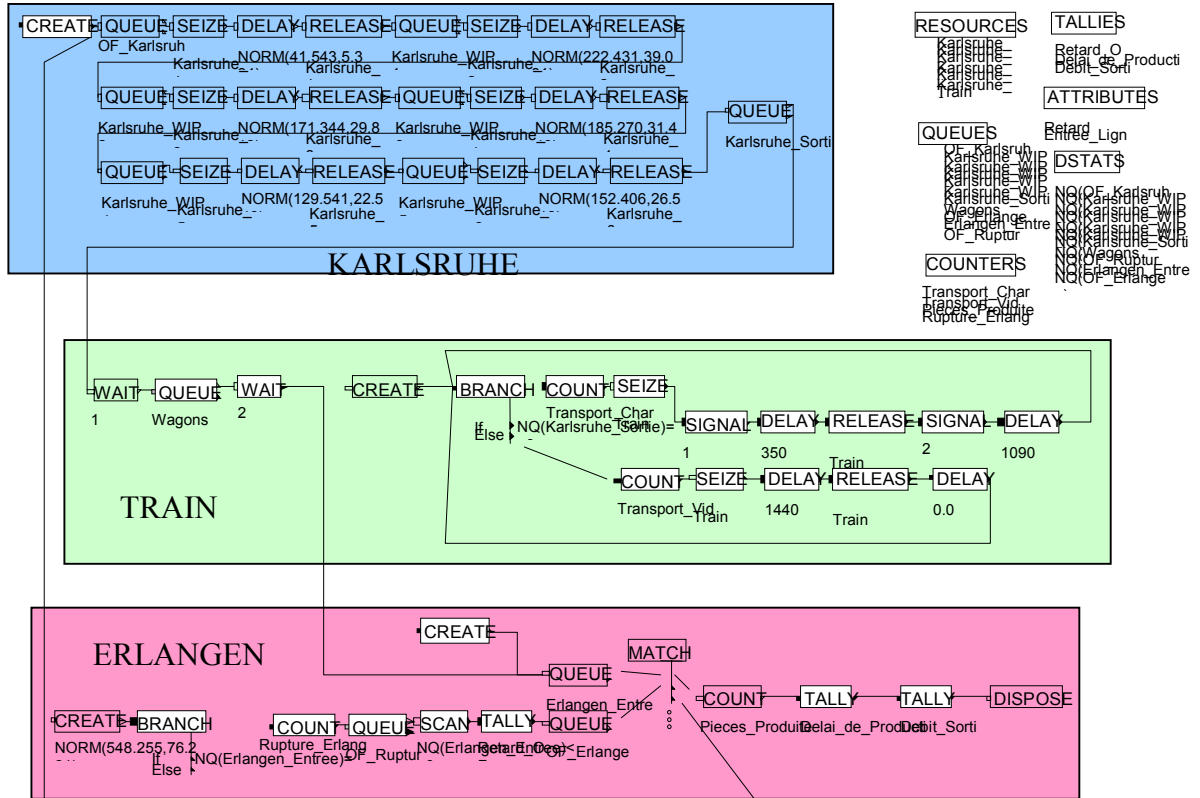
	Niveau de structure	Paramètres											Indicateurs					Méthode	Thème	Gestion			
		Relations sites	Gestion stocks	Demande	Carac. sites	Structure	Coûts	Transports	Appro.	Carac. produits	Service client	Liés à l'argent	Stocks	Temps de fab.	Variabilité	Production							
[AVI 01]	Binaire	X			X										X					TN	coopération	Poussé	
[AXS 01]	Binaire	X	X												X						TN	coopération	Tiré
[BHA 00]	Binaire			X			X								X						TN	coopération	Poussé
[CAC 00]	Binaire	X	X		X										X						TN	coopération	Tiré
[CAC 01b]	Binaire		X	X											X						TN	coopération	Tiré
[CAC 01c]	Binaire	X													X						TN	coopération	Poussé
[CHE 01a]	Binaire	X													X						TN	coopération	
[CHE 01b]	Binaire	X													X						TN	coopération	
[GAV 02]	Binaire	X		X			X								X						TN	coopération	Tiré
[GJE 02]	Binaire		X						X	X	X										TN	coopération	
[HOM 00]	Binaire								X												TN	coopération	
[KLA 02]	Binaire	X													X						TN	coopération	
[TAY 01]	Binaire						X								X						TN	coopération	
[VIS 01]	Binaire		X				X								X						TN	coopération	
[THO 02b]	Binaire									X	X	X									TN	paramètres	
[AXS 03]	Chaîne		X												X						TN	coopération	Tiré
[HAE 02]	Chaîne	X													X						TN	coopération	
[MUN 01]	Chaîne		X												X						TN	coopération	
[CHU 01]	Chaîne		X												X						TN	planification	
[BER 99]	Chaîne								X						X						TN	transport	
[AGR 00]	Réseau	X													X						TN	coopération	Poussé
[TAL 02]	Réseau					X									X				X		TN	évaluation	
[LIN 98]	Réseau	X									X	X									TN	information	
[GRA 96]	Réseau				X				X				X								TN	planification	Tiré
[PAR 99]	Réseau		X												X						TN	planification	
[DEJ 03]	Binaire		X																X		TD	bullwhip	Poussé
[BAI 00]	Binaire								X	X											TD	coopération	
[BAI 01]	Binaire	X													X						TD	coopération	
[CHE 01c]	Binaire	X													X						TD	coopération	
[COR 01a]	Binaire	X	X																		TD	coopération	Tiré
[COR 01b]	Binaire	X	X				X								X						TD	coopération	
[DEL 01]	Binaire	X													X						TD	coopération	Poussé
[ERT 02]	Binaire	X								X					X						TD	coopération	
[KIM 00]	Binaire			X											X						TD	coopération	
[MOS 00]	Binaire		X												X						TD	coopération	Po/Tiré
[RAG 01]	Binaire	X													X						TD	coopération	
[RAG 03]	Binaire	X					X														TD	coopération	
[SCH 98]	Binaire	X													X	X					TD	coopération	Tiré
[TAY 02]	Binaire	X													X						TD	coopération	
[WEN 99]	Binaire	X													X						TD	coopération	
[ZHA 02b]	Binaire								X	X	X										TD	coopération	

	Niveau de structure	Paramètres										Indicateurs				Méthode	Thème	Gestion	
		Relations sites	Gestion stocks	Demande	Carac. sites	Structure	Coûts	Transports	Appro.	Carac. produits	Service client	Liés à l'argent	Stocks	Temps de fab.	Variabilité				Production
[TEM 00]	Binaire					X				X							TD	évaluation	Tiré
[WAN 02]	Binaire		X								X						TD	évaluation	Tiré
[ZIL 99a]	Binaire				X					X	X						TD	évaluation	Tiré
[GAV 99]	Binaire	X	X								X						TD	information	Tiré
[CHI 03]	Binaire				X					X	X						TD	Internet	
[LEE 02]	Binaire				X					X	X						TD	Internet	
[CAC 01a]	Binaire		X							X	X						TD	paramètres	Tiré
[KIM 03]	Binaire	X									X						TD	paramètres	Poussé
[KOU 02]	Binaire			X				X									TD	paramètres	Poussé
[LI 02]	Binaire	X	X			X					X						TD	paramètres	
[MAH 01]	Binaire		X		X						X	X					TD	paramètres	
[HEL 99]	Binaire																TD	planification	
[JAI 01]	Binaire			X							X		X				TD	planification	Tiré
[KAR 02]	Binaire		X								X						TD	planification	Poussé
[KIM 02a]	Binaire			X	X	X					X						TD	planification	
[THO 02a]	Binaire	X								X	X		X				TD	planification	Poussé
[VEE 00]	Binaire										X						TD	planification	
[ZHA 01]	Binaire			X	X			X		X	X						TD	planification	
[ZHA 02a]	Binaire	X	X								X						TD	planification	
[CHE 02a]	Binaire	X						X			X	X					TD	transport	Tiré
[CAR 00]	Chaîne	X											X				TD	bullwhip	Poussé
[CHE 99]	Chaîne				X	X								X			TD	bullwhip	Poussé
[LEE 97a]	Chaîne												X				TD	bullwhip	Poussé
[GAU 00]	Chaîne	X		X							X						TD	coopération	
[LEE 01b]	Chaîne					X			X		X						TD	coopération	
[LEE 99]	Chaîne	X									X						TD	coopération	Tiré
[PAS 00]	Chaîne			X	X					X							TD	coopération	Tiré
[DIM 95]	Chaîne		X					X		X	X						TD	évaluation	Tiré
[ZIL 01]	Chaîne		X		X			X				X					TD	évaluation	Tiré
[PAR 98a]	Chaîne			X	X							X			X		TD	modélisation	
[THI 01]	Chaîne				X			X		X							TD	modélisation	Tiré
[COR 01c]	Chaîne					X					X			X			TD	paramètres	
[RID 02]	Chaîne											X		X			TD	paramètres	
[ZIL 99b]	Chaîne		X	X	X			X		X	X						TD	paramètres	Tiré
[GRA 98]	Chaîne				X							X	X				TD	planification	Poussé
[THO 02c]	Chaîne																TD	planification	
[VRO 00]	Chaîne		X				X	X			X						TD	transport	
[BAG 98]	Réseau		X								X		X				TD	bullwhip	Tiré
[WU 98]	Réseau																TD	bullwhip	
[SWA 97]	Réseau	X		X	X					X	X						TD	coopération	
[ARC 99]	Réseau	X								X	X	X					TD	évaluation	Poussé
[ARN 95]	Réseau				X						X						TD	évaluation	
[BAU 01]	Réseau			X						X	X			X			TD	évaluation	Tiré

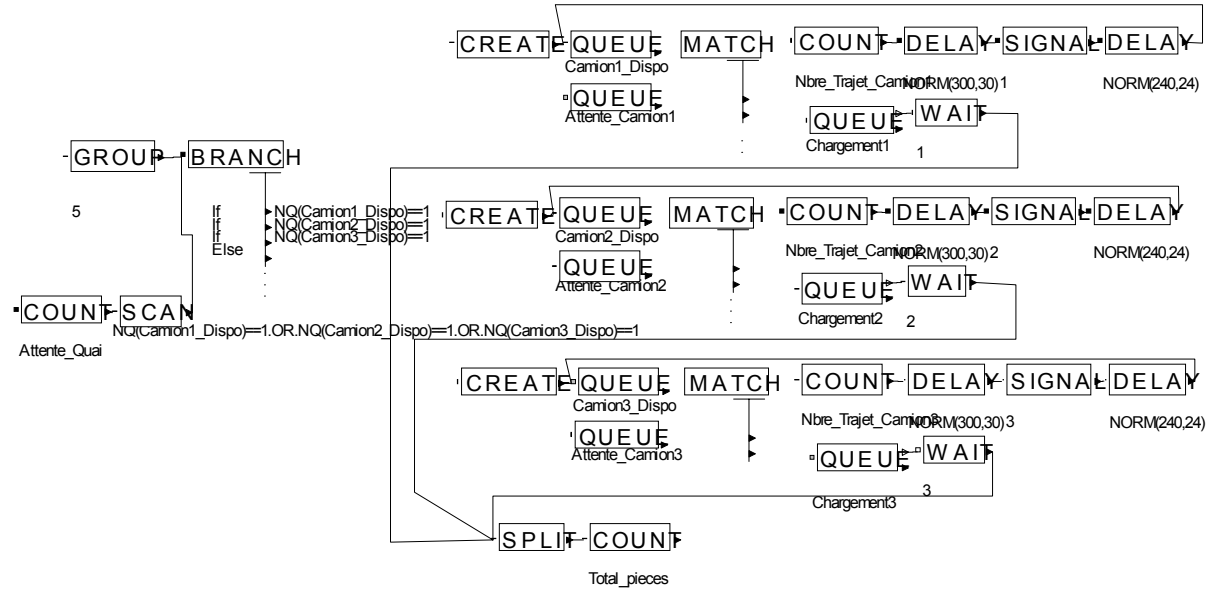
	Niveau de structure	Paramètres										Indicateurs					Méthode	Thème	Gestion
		Relations sites	Gestion stocks	Demande	Carac. sites	Structure	Coûts	Transports	Appro.	Carac. produits	Service client	Liés à l'argent	Stocks	Temps de fab.	Variabilité	Production			
[CAM 97]	Réseau					X						X					TD	évaluation	
[COH 88]	Réseau			X		X					X	X	X				TD	évaluation	Tiré
[ERN 00]	Réseau				X		X					X					TD	évaluation	
[ETT 00]	Réseau		X	X	X		X				X	X					TD	évaluation	Poussé
[JAN 01]	Réseau							X			X	X	X	X		X	TD	évaluation	
[JEL 01]	Réseau			X					X		X						TD	évaluation	Tiré
[KON 00]	Réseau		X								X						TD	évaluation	
[LEE 93a]	Réseau		X								X						TD	évaluation	Tiré
[LEE 93b]	Réseau																TD	évaluation	
[LEE 95]	Réseau			X	X			X			X		X				TD	évaluation	
[RAO 98]	Réseau					X					X	X					TD	évaluation	Tiré
[SRI 01]	Réseau			X	X	X							X	X			TD	évaluation	Tiré
[UME 98]	Réseau																TD	évaluation	Po/Tiré
[VID 01]	Réseau						X					X					TD	évaluation	
[VIS 99]	Réseau			X	X	X					X		X	X			TD	évaluation	
[ZEN 99]	Réseau			X	X							X		X			TD	Internet	
[FLE 01]	Réseau					X		X				X					TD	modélisation	
[FOX 00]	Réseau																TD	modélisation	
[JAI 99]	Réseau										X		X	X			TD	modélisation	Po/Tiré
[LEE 01a]	Réseau										X					X	TD	modélisation	Po/Tiré
[MON 03]	Réseau																TD	modélisation	
[PAR 98b]	Réseau			X									X				TD	modélisation	
[PON 02]	Réseau	X										X					TD	modélisation	
[SAU 99]	Réseau																TD	modélisation	Poussé
[SIM 01]	Réseau											X	X				TD	modélisation	
[SWA 98]	Réseau								X		X	X		X			TD	modélisation	
[TEI 97]	Réseau				X						X		X				TD	modélisation	Poussé
[BEA 01]	Réseau			X	X			X	X		X	X	X				TD	paramètres	Tiré
[MUL 99]	Réseau		X	X											X		TD	paramètres	Tiré
[BER 02]	Réseau										X			X	X		TD	planification	Poussé
[FEI 99]	Réseau		X								X		X				TD	planification	Poussé
[FRE 01]	Réseau																TD	planification	
[GAR 02]	Réseau		X									X	X	X			TD	planification	Tiré
[KHO 02]	Réseau	X										X					TD	planification	
[LAK 01]	Réseau			X								X					TD	planification	
[MAR 93]	Réseau											X					TD	planification	
[MUK 03]	Réseau		X								X	X	X				TD	planification	
[ROB 02]	Réseau		X								X	X	X				TD	planification	
[TIM 00]	Réseau		X								X	X					TD	planification	
[GRA 01]	Réseau	X										X	X				TD	transport	Tiré
[ROY 89]	Réseau											X		X			TD	transport	
[AND 99]					X						X	X	X				TD	modélisation	
[KIM 02b]	E(Réseau)	X									X	X		X			EN	coopération	
[ALD 03]	E(Réseau)																EN	Internet	

	Niveau de structure	Paramètres										Indicateurs				Méthode	Thème	Gestion	
		Relations sites	Gestion stocks	Demande	Carac. sites	Structure	Coûts	Transports	Appro.	Carac. produits	Service client	Liés à l'argent	Stocks	Temps de fab.	Variabilité				Production
[YTT 99]	E(Binaire)																ED	coopération	
[THE 01]	E(Binaire)	X															ED	information	
[KEE 00]	E(Binaire)																ED	paramètres	
[PAG 01]	E(Binaire)									X							ED	paramètres	
[WYC 99]	E(Binaire)																ED	paramètres	
[NOV 01]	E(Binaire)								X								ED	planification	
[LEE 97b]	E(Chaîne)												X				ED	bullwhip	
[SAG 02]	E(Chaîne)																ED	paramètres	
[KEK 99]	E(Réseau)										X						ED	coopération	
[CLA 01]	E(Réseau)																ED	information	
[COH 01]	E(Réseau)																ED	information	
[JON 02]	E(Réseau)				X												ED	optimisation	
[LIP 01]	E(Réseau)																ED	organisation	
[SIE 00]	E(Réseau)																ED	organisation	
[SMI 00]	E(Réseau)	X															ED	organisation	
[DAV 02]	E(Réseau)										X						ED	paramètres	
[RAN 01]	E(Réseau)							X		X							ED	paramètres	
[AKK 03]	E(Réseau)																ED	planification	
[BRI 02]																	B		
[CRO 00]																	B		
[GAN 99]																	B		
[GOE 02]	Chaîne				X	X				X	X						B		
[GRI 03]																	B		
[KES 01]	Chaîne								X	X							B		
[KOK 00]																	B		
[LAM 01]																	B		
[LIL 00]																	B		
[LOU 03]																	B		
[MET 98]																	B		
[NIS 00a]																	B		
[OTT 03]																	B		
[SOD 01]																	B		
[TAN 01]																	B		
[TSA 99]																	B		
[VIL 02]																	B		
[WAL 99]																	B		
[NIS 00b]	Réseau										X		X				App. Ind.	évaluation	
[POO 94]	Réseau				X					X	X						App. Ind.	évaluation	

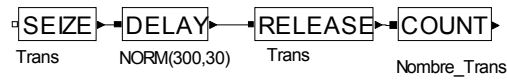
Annexe C : Modélisation sous Arena de la liaison quotidienne par train entre deux sites de production (également applicable au bateau)



Annexe D : Modélisation sous Arena de la liaison directe par une flotte de trois camions entre deux sites de production

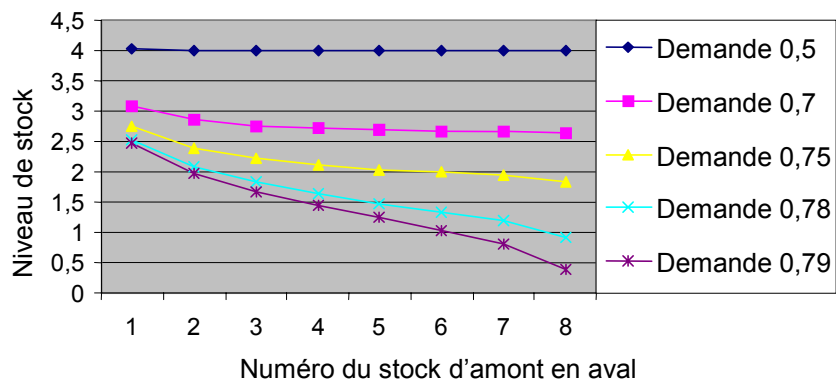


Annexe E : Représentation sous Arena de la modélisation simplifiée des transports utilisée avec Palkan



Annexe F : Une réflexion sur l'effet Bullwhip

Au cours de nos expériences avec le logiciel Palkan, nous avons essayé d'observer l'effet Bullwhip. Pour l'observer, il est plus facile d'étudier un réseau linéaire pour étudier les phénomènes se produisant lorsqu'on remonte le réseau. Nous avons donc construit un réseau linéaire avec 8 stocks successifs, le premier représentant le fournisseur de matières premières et le huitième représentant le revendeur. Nous nous sommes placés dans des cas où la capacité de production n'est pas très supérieure à la demande. Nous avons fixé la capacité de production et fait varier le taux de demande de 0.5 à 0.79. Dans le premier cas, nous avons un taux de service de 97% et dans le dernier, un taux de service de 13%. Nous avons observé les niveaux moyens de stocks dans l'ensemble du réseau, sachant que les boucles kanbans sont toutes identiques, à savoir 5 kanbans. Nous avons obtenu les relevés suivant :



Visualisation des niveaux moyens des stocks dans un réseau linéaire

Ce que l'on observe sur ces courbes c'est que le niveau des stocks est de plus en plus élevé lorsqu'on remonte le long du réseau. Ce phénomène s'amplifie lorsque la demande augmente et que le réseau connaît des difficultés pour répondre à l'attente du client. Loin d'observer l'effet Bullwhip, qui serait une instabilité croissante en remontant le long de la chaîne, on observe que la partie amont du réseau est de moins en moins perturbée et les stocks de moins en moins affectés.

Les explications sont diverses. Tout d'abord, l'effet Bullwhip est un phénomène dynamique et notre méthode n'est pas faite pour étudier ce genre de chose. De plus, la gestion par kanbans ne s'appuie pas sur des prévisions de commandes ce qui est une des causes majeures de l'effet Bullwhip.