



HAL
open science

Instrumentation du “ transshipment d’urgence ” comme mode de coopération pour l’amélioration du pilotage des flux dans les réseaux de distribution

Mounira Tlili Ben Hamida

► **To cite this version:**

Mounira Tlili Ben Hamida. Instrumentation du “ transshipment d’urgence ” comme mode de coopération pour l’amélioration du pilotage des flux dans les réseaux de distribution. Gestion et management. INSA de Lyon, 2011. Français. NNT : 2011ISAL0065 . tel-00694433

HAL Id: tel-00694433

<https://theses.hal.science/tel-00694433>

Submitted on 4 May 2012

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

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



UNIVERSITE DE TUNIS EL MANAR
FACULTE DES SCIENCES DE TUNIS



INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

FORMATION DOCTORALE EN INFORMATIQUE

THESE

présentée en vue de l'obtention du
Doctorat en Informatique

par

Mounira TLILI-BEN HAMIDA

(DEA en Informatique, FS Tunis)

**Instrumentation du « transshipment d'urgence »
comme mode de coopération pour l'amélioration du
pilotage des flux dans les réseaux de distribution**

soutenue le 02 juillet 2011, devant le jury d'examen

M.	Riadh ROBBANA	Professeur (INSAT-Tunis, Tunisie), Président
M.	Van-Dat CUNG	Professeur (INP-Grenoble, France), Rapporteur
M.	Habib CHABCHOUB	Professeur (FSEG-Sfax, Tunisie), Rapporteur
Mme	Colette MERCÉ	Professeur (INSA-Toulouse, France), Membre
M.	Mohamed MOALLA	Professeur (FS-Tunis, Tunisie), Directeur de thèse
M.	Jean-Pierre CAMPAGNE	Professeur (INSA-Lyon, France), Directeur de thèse

Thèse préparée dans le cadre des projets CMCU 05/S1105 et 09/G1112, sous convention de cotutelle
FST-Tunis, Tunisie (Laboratoire LIP2) et INSA- Lyon, France (Laboratoire DISP (ex-LIESP))

Remerciements

Je remercie Monsieur Mohamed MOALLA, professeur à la Faculté des Sciences de Tunis, pour la qualité de l'encadrement scientifique qu'il m'a assuré dès mon mémoire de DEA et jusqu'à la fin de mes travaux de thèse. Je le remercie pour ses conseils judicieux et ses critiques qui m'ont permis de mener à bien ces travaux et, notamment, d'apprendre des règles de l'art en recherche.

Je remercie de même Monsieur Jean-Pierre CAMPAGNE, professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France), pour avoir été à l'origine du sujet de cette thèse et pour la co-direction qu'il bien voulu assurer. Je le remercie pour l'accueil chaleureux qu'il m'a réservé durant les périodes de stage au laboratoire DISP (ex-LIESP) et pour ses conseils pertinents dans l'abord cognitif de ce travail.

J'adresse également mes remerciements à Messieurs Van-Dat CUNG, professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble (France), et Habib CHABCHOUB, professeur à la Faculté des Sciences Economiques et de Gestion de Sfax, pour le soin avec lequel ils ont rapporté mes travaux et la caution qu'ils leur ont accordé nonobstant un ensemble de critiques judicieuses.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Riadh ROBBANA, professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées et de Technologies de Tunis, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de soutenance ainsi qu'à Madame Colette MERCÉ, professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (France), pour avoir bien voulu accepter de faire partie du jury.

Je ne puis ne pas associer à ces remerciements Zied BAHROUN, maître de conférences à la Faculté des Sciences de Tunis, pour ses conseils avisés et ses sincères encouragements et tous les membres du laboratoire LIP2 pour m'avoir fait bénéficier d'un environnement stimulant et chaleureux.

Dédicaces

*À mes parents
À mon mari et ma fille
À tous ceux qui me sont Chers
À la mémoire de ma grande mère*

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	8
<i>Guide de notations</i>	12
<i>Partie 1</i>	14
<i>État de l'art</i>	14
Chapitre 1 : Chaînes logistiques	15
1.1 Introduction	16
1.2 Les flux de la chaîne logistique	17
1.2.1 Les flux physiques	17
1.2.2 Les flux d'information	18
1.2.3 Les flux financiers	18
1.3 Les structures de chaînes logistiques	18
1.3.1 Les structures physiques des chaînes	18
1.3.11 Structure série	18
1.3.12 Structure dyadique	19
1.3.13 Structure convergente	19
1.3.14 Structure divergente	19
1.3.15 Structure réseaux	20
1.3.2 Les modes de pilotage	20
1.4 Les fondamentaux des réseaux logistiques	20
1.4.1 L'effet de bullwhip	20
1.4.2 L'effet \sqrt{N}	21
1.4.3 Les principes de coopération et de coordination	21
1.4.31 La coopération	21
1.4.32 La coordination	22
1.5 Les outils de la coopération et de la coordination	23
1.5.1 L'Electronic Data Interchange (EDI)	23
1.5.2 L'Efficient Consumer Response (ECR)	23
1.5.3 Le Vendor Managed Inventory (VMI)	23
1.5.4 Le Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment (CPFR)	23
1.5.5 L'Available To Promise (ATP)	24
1.5.51 Le principe d'ATP	24
1.5.52 Les modèles ATP	25
1.6 Conclusion	25
Chapitre 2 : Les méthodes de gestion de stock dans les structures un(multi) échelon(s) 26	
2.1 Le système de stock	27
2.2 Coûts des stocks	28
2.3 Structure à un échelon	29
2.3.1 Terminologie des stocks	29
2.3.11 Principes et fonctionnement	29
2.3.12 Système de décision avec demandes probabilistes	29

2.3.2	L'importance de l'article : classification ABC.....	31
2.3.3	Révision continue versus révision périodique.....	31
2.3.4	Les politiques de gestion des stocks.....	32
2.3.41	La politique à point de commande, quantité à commander (s, Q).....	32
2.3.42	La politique à point de commande, niveau de reapprovisionnement (s, S).....	32
2.3.43	La politique à révision périodique, niveau de reapprovisionnement (R, S).....	33
2.3.44	La politique (R, s, S).....	34
2.3.45	Autres politiques de gestion de stock.....	34
2.4	Les difficultés de la politique de gestion (R, s, S).....	35
2.4.1	La notion d'undershoot.....	35
2.4.2	Caractéristiques de la fonction coût.....	35
2.5	Objectifs spécifiés : coût et service.....	37
2.5.1	Présentation.....	37
2.5.2	Les taux de service.....	37
2.5.21	Type I ou α	37
2.5.22	Type II ou β	37
2.5.23	Type III ou γ	38
2.6	Modélisation théorique du stock et calcul du stock de sécurité.....	38
2.6.1	Caractéristiques de la demande.....	38
2.6.2	Heuristiques pour la politique (s, Q).....	39
2.6.21	Règle de décision pour un taux de service α spécifié.....	39
2.6.22	Règle de décision pour un taux de service β spécifié.....	39
2.6.221	Modèle de demandes différées.....	39
2.6.222	Modèle de demandes perdues.....	40
2.6.3	Heuristique pour la politique (R, S).....	41
2.6.4	Heuristiques pour la politique (R, s, S).....	42
2.6.41	Approximation des valeurs (s, S) basée sur un coût de rupture spécifié.....	42
2.6.42	Approximation des valeurs (s, S) basée sur un taux de service spécifié.....	42
2.7	Structure multi échelons.....	43
2.7.1	Les problèmes liés aux systèmes de stock multi échelons.....	43
2.7.11	Caractéristiques générales.....	43
2.7.12	Stock échelon versus stock installation.....	44
2.7.2	Types d'un système arborescent.....	45
2.7.21	Système arborescent sans conservation de stock dans le centre de distribution.....	45
2.7.22	Système arborescent avec conservation de stock chez le centre de distribution.....	45
2.8	Conclusion.....	46
Chapitre 3 : Les problèmes de transshipment.....		47
3.1	Préliminaire et définitions.....	48
3.2	Les politiques de transshipment.....	48
3.3	Classification des travaux de recherche.....	49
3.3.1	Types de problèmes.....	50
3.3.2	Méthodes de résolution et difficultés rencontrées.....	50
3.3.3	Les principaux environnements étudiés pour l'application du transshipment.....	51
3.4	Les modèles de transshipment d'urgence.....	52
3.4.1	Les modèles de transshipment avec la politique (R, S).....	52
3.4.2	Les modèles de transshipment avec la politique (s, Q).....	54
3.4.3	Les modèles de transshipment avec la politique (S-1, S).....	54
3.4.4	Les modèles de transshipment avec les politiques (s, S) et (R, s, S).....	55
3.5	Les modèles de transshipment préventif.....	56
3.6	Autres applications du transshipment.....	57
3.7	Conclusion.....	62
Partie 2.....		63
Modélisation et résolution.....		63
Chapitre 4 : Système à deux échelons et deux détaillants, avec coût de transshipment linéaire.....		64
4.1	Modélisation mathématique.....	65

4.1.1	Description générale du problème.....	65
4.1.2	Notations et hypothèses adoptées.....	66
4.1.3	Modèle simplifié de (Cohen et al. 88) d'un système sans transshipment.....	67
4.1.4	Passage du modèle simplifié de (Cohen et al. 88) à un modèle à deux détaillants avec transshipment.....	70
4.1.41	Espérance mathématique de la quantité de transshipment.....	70
4.1.42	Espérance mathématique de la quantité perdue.....	72
4.1.43	Calcul du coût total.....	73
4.1.5	Limites de la solution obtenue.....	76
4.2	Approche par simulation-optimisation.....	76
4.2.1	Analogie des notations utilisées entre le modèle mathématique et le modèle de simulation.....	76
4.2.2	Les politiques de transshipment explorées.....	77
4.2.3	Modèle de stock (R, s, S) à demandes perdues intégrant le transshipment.....	78
4.2.4	Le problème d'optimisation.....	80
4.2.5	Résolution par simulation-optimisation.....	80
4.2.51	Modèle de simulation retenu.....	80
4.2.52	Calcul des valeurs initiales de la politique (R, s, S).....	81
4.2.53	Procédure de recherche.....	81
4.3	Expérimentation.....	83
4.3.1	Description du cas d'étude.....	83
4.3.2	Analyse des apports du transshipment.....	85
4.3.21	Système avec transshipment vs. système sans transshipment.....	85
4.3.22	Complete pooling vs. Tout ou rien.....	87
4.3.23	Effets de l'écart type et du délai d'approvisionnement.....	88
4.3.231	Effet de l'écart type de la demande.....	89
4.3.232	Effet du délai d'approvisionnement.....	89
4.3.233	Système symétrique vs. système asymétrique en délais d'approvisionnement.....	90
4.4	Conclusion.....	92
Chapitre 5 : Système à deux échelons et détaillants multiples, avec coût de transshipment fixe.....		93
5.1	Problème du transshipment dans un système de stock multi détaillants.....	94
5.2	Formulation du problème.....	95
5.3	Système de stock (R, s, S) à détaillants multiples.....	96
5.3.1	Démarche retenue.....	96
5.3.2	Analyse des résultats.....	97
5.3.21	Impacts des paramètres d'entrée (N, L_i, σ_i) sur la politique complete pooling standard.....	98
5.3.211	Impacts du paramètre N	98
5.3.212	Impacts du paramètre L_i	99
5.3.213	Impacts du paramètre σ_i	100
5.3.22	Impacts de la contrainte capacité du transshipment (Q_{max}).....	101
5.3.23	Complete pooling plafonné vs. complete pooling standard.....	103
5.4	Vers une résolution par une politique de stock de type (R, s, s+Q).....	105
5.4.1	Choix d'approximation de la quantité Q	105
5.4.2	Évaluation des différentes politiques de stock.....	105
5.5	Étude de l'impact des paramètres coûts.....	107
5.5.1	Contexte d'expérimentation.....	107
5.5.2	Analyse des résultats.....	108
5.5.3	Effet du coût de transshipment.....	111
5.6	Complete pooling standard vs. complete pooling conditionné.....	112
5.7	Effet du taux de service.....	113
5.8	Conclusion.....	116
Chapitre 6 : Transshipment dans un réseau de distribution multi échelons.....		118
6.1	Système de stock avec transshipment dans un réseau de distribution multi échelons.....	119
6.1.1	Description du problème.....	119
6.1.2	Hypothèses du modèle.....	120
6.1.3	Notations.....	120

6.2	Démarche de résolution	121
6.2.1	Procédures d'allocation du stock disponible au niveau du centre de distribution	121
6.2.2	Formulation des problèmes d'optimisation	122
6.2.3	Solutions initiales	123
6.2.31	Pour les détaillants	123
6.2.311	Solution initiale pour le problème d'optimisation 1	123
6.2.312	Solution initiale pour les problèmes d'optimisation 2 et 3	124
6.2.32	Pour le centre de distribution	125
6.2.321	Solution initiale pour le niveau de reapprovisionnement	125
6.2.321	Solution initiale pour le point de commande	125
6.2.4	Modèle de stock intégrant le transshipment d'un système multi échelons	126
6.2.41	Modèle de stock (R', s, S) pour le centre de distribution	126
6.2.42	Modèle de stock (R, s, S) avec demandes perdues pour les détaillants	126
6.2.5	Modèle de simulation-optimisation	127
6.3	Les résultats numériques	128
6.3.1	Étude du problème d'optimisation 1	128
6.3.11	Impact du délai d'approvisionnement du centre de distribution	128
6.3.12	Impact du délai d'approvisionnement des détaillants	130
6.3.13	Impact de l'écart type de la demande	131
6.3.2	Étude du système de stock multi échelons sous contrainte de taux de service	133
6.3.21	Systèmes de stock sous contrainte d'un taux de service global du système	133
6.3.22	Système de stock à taux de service global vs. système de stock à taux de service spécifique à chaque détaillant	136
6.3.3	Évaluation des solutions initiales	137
6.4	Conclusion	140
	Conclusion générale	141
	Le logiciel Crystal Ball	147
1.	Présentation sommaire	147
2.	L'outil OptQuest 2.3®	148
3.	Modèle basé simulation-optimisation pour un système de stock avec transshipment de deux détaillants identiques	150
3.1	Modèle de simulation	150
3.2	Modèle d'optimisation	152
4.	Comparaison entre deux systèmes de stock	156
	Références bibliographiques	157

Introduction générale

Le réseau de distribution dans les chaînes logistiques est la composante essentielle à travers laquelle s'effectue l'écoulement des flux de produits vers les clients. Dans le cas classique, le réseau est à trois échelons : "entrepôt central de sortie d'usine(s)", "centres de distribution" et "détaillants", ces derniers étant en contact direct avec les clients finals. La distribution des produits s'effectue de manière descendante (entrepôt vers centres de distribution et centres de distribution vers détaillants) et ce, selon une politique donnée de gestion des stocks. Cette politique doit tenir en compte, à la fois, des contraintes liées à la stratégie arrêtée vis-à-vis de la qualité de service dans la satisfaction des demandes clients (notamment, dans le cas où les demandes sont incertaines) et des contraintes liées à la rentabilité économique face au coût global du stockage et le risque d'obsolescence pour certains produits.

La problématique du pilotage des flux à travers un tel réseau est de toute évidence complexe. D'abord, elle dépend de la configuration du réseau considéré. Ensuite, elle doit intégrer la prise en compte d'une multitude de paramètres : nombre de produits différents, comportement dans le temps de la demande, taux de satisfaction ciblé, sort des commandes non satisfaites (différées ou perdues), politique de gestion des stocks chez les détaillants et chez les centres de distribution, délais d'approvisionnement (entrepôt vers centres de distribution et centres de distribution vers détaillants), différents coûts (commande, possession, rupture), La compétitivité de plus en plus accrue des marchés pousse encore à une optimisation plus serrée des coûts en cherchant des améliorations à travers la coopération (échanges d'information et/ou transferts de produits) entre les sites du réseau. Le « transshipment latéral » est l'une de ces voies. Il consiste à organiser les transferts de stocks entre les sites de même échelon, soit selon une politique préventive pour réduire les risques de rupture face aux demandes clients, soit selon une politique d'urgence pour résoudre les cas de rupture effective. S'ajoute, ainsi, à la complexité de la problématique du pilotage des flux, la prise en compte de la politique du transshipment, de ses règles particulières et de ses coûts.

Cette complexité fait que les mécanismes de gestion des stocks disponibles, étudiés pour être implémentés dans les progiciels ERP, APS ou SCM, demeurent relativement simples. Aussi, la plupart des recherches qui ont abordé la problématique globale exposée ici (en y intégrant le transshipment) sont restées limitées à des structures comprenant un entrepôt, un seul centre de distribution et deux ou plusieurs détaillants. Elles se sont intéressées principalement aux systèmes à demandes clients

aléatoires et à politiques de gestion des stocks du type (R, S) , (s, Q) , $(S-1, S)$ et (s, S) à demandes différées ou (s, Q) à demandes perdues. Pour ces politiques, certains auteurs ont cherché à étudier, sous des hypothèses restrictives, des modèles mathématiques probabilistes, tandis que d'autres se sont orientés vers l'analyse de modèles de simulation en relaxant quelques hypothèses. On parle de systèmes de stock à deux échelons quand le centre de distribution est considéré à capacité infinie (dans ce cas, le rôle de l'entrepôt central se confond avec celui du centre de distribution et les seuls délais d'approvisionnement qui sont pris en compte sont ceux entre le centre de distribution et les détaillants). On parle de systèmes de stock multi échelons dès que aussi bien les sites détaillants que le centre de distribution sont soumis à des politiques de gestion spécifiques ainsi qu'à des délais d'approvisionnement. Les travaux rapportés dans ce mémoire de thèse s'insèrent parmi ces recherches ; ils sont focalisés principalement sur l'exploration des apports possibles du transshipment (latéral) d'urgence pour un réseau de distribution mono produit.

Nous considérons que les détaillants sont confrontés à des demandes aléatoires suivant la loi normale et gèrent leur stock selon la politique (R, s, S) ; à chaque période de révision R , une commande est passée pour ramener la position de stock au niveau de recombplètement S si la position de stock se trouve égale ou inférieure au seuil s . Nous supposons que les demandes chez les détaillants sont indépendantes et identiquement distribuées. Nous supposons aussi que le temps de transshipment entre détaillants est nul et que la partie de demande qui n'a pu être satisfaite après les tentatives de transshipment est perdue.

Nous étudions trois structures différentes de réseau :

- système de stock à deux échelons et deux détaillants, avec coût de transshipment par unité ;
- système de stock à deux échelons et détaillants multiples, avec coût fixe de transshipment par transaction, quelle que soit la quantité impliquée ;
- système de stock multi échelons à deux détaillants, également avec coût fixe de transshipment.

Pour chacune de ces structures, nous testons différentes combinaisons de valeurs des paramètres d'entrée :

- demandes aléatoires des clients, à écarts types identiques ou différents, à variation faible ou élevée ;
- délais d'approvisionnement identiques ou différents, courts ou longs ;
- coûts différents de commande, de possession, de rupture et de transshipment ;
- taux de service minimum exigé ;
- nombre de détaillants (dans la structure du deuxième type) faible, moyen ou élevé.

Notre objectif est de :

- déterminer, pour chaque site (détaillants et centre de distribution), les seuils de stocks (s, S) qui minimisent le coût total du système tout en garantissant un taux de service désiré,
- analyser l'impact de chacun des paramètres sur le comportement du système, notamment pour ce qui concerne l'intérêt du recours au transshipment.

Nous commençons par approcher chaque cas par une étude analytique sous des hypothèses restrictives, en nous appuyant sur les résultats des travaux réalisés dans le domaine de l'optimisation de la gestion classique des stocks (sans transshipment) dans les structures un(multi) échelon(s) et mono produit ainsi que ceux des travaux ayant abordé des problèmes de transshipment dans les structures deux/multi échelons et mono produit. Nous utilisons, ensuite, les formulations mathématiques obtenues pour approfondir l'analyse à travers l'élaboration et l'expérimentation de modèles admettant des hypothèses beaucoup plus larges, dont la résolution est fondée sur la simulation-optimisation.

Le mémoire est présenté en deux parties. La première, constituée des chapitres 1 à 3, est consacrée à la synthèse de l'état de l'art et la préparation des assises de nos travaux. La deuxième, constituée des chapitres 4 à 6, développe nos contributions et leurs résultats. L'ensemble est structuré comme suit :

- Dans le chapitre 1, nous commençons par de brefs rappels sur les chaînes logistiques, en nous attardant de façon particulière sur les différentes structures des réseaux de distribution, ce qui nous permet de mieux positionner le cadre de notre étude. Nous présentons aussi les principaux outils de coopération et de coordination.

- Le chapitre 2 rapporte l'état de l'art des méthodes de gestion de stock. Dans un premier temps, nous passons en revue les différentes méthodes de gestion (classique) de stock d'un seul site ainsi que les différents types de taux de service considérés dans la littérature. Nous poursuivons par la modélisation théorique du stock et le calcul du stock de sécurité, puis nous exposons les modèles de gestion de stock dans une structure multi échelons et les difficultés induites par la complexité de cette structure quant à la détermination des seuils s et S . Ce faisant, nous mettons en exergue les caractéristiques de certaines heuristiques performantes liées à la politique de stock (R, s, S) .

- Le chapitre 3 consiste en l'étude des différentes politiques de transshipment existantes, les types de problèmes rencontrés et les principaux environnements étudiés pour leur application. Nous détaillons, en particulier, les modèles de transshipment d'urgence utilisant des politiques (R, S) , (s, Q) , $(S-1, S)$, $(s ; S)$ et (R, s, S) . Un relevé synthétique des caractéristiques, pour plus d'une trentaine de travaux, est présenté.

- Dans le chapitre 4, nous étudions un système de stock à deux échelons et deux détaillants, avec coût de transshipment linéaire et politique de gestion de stock du type (R, s, S) . Nous commençons par formuler la modélisation mathématique partant du modèle simplifié de Cohen et al. (Cohen et al. 88), développé pour un système à un seul détaillant et sans transshipment. Sur la base de cette formulation, nous entamons une première étude analytique sous des hypothèses restrictives puis nous évoluons vers un modèle plus complet, basé simulation-optimisation, sur lequel nous analysons le comportement du système de stock considéré sous des hypothèses plus libres. Nous examinons la sensibilité du comportement coopératif du transshipment vis-à-vis d'un certain nombre de paramètres d'entrée (écart type de la demande, délai d'approvisionnement, coût de rupture et coût de transshipment) et ce, pour deux

politiques différentes de transshipment (« tout ou rien » et « complete pooling standard »).

- Le chapitre 5 élargit l'étude précédente au cas d'un réseau à détaillants multiples. La complexité de la résolution impose, d'emblée, d'adopter deux simplifications : délais d'approvisionnement identiques pour tous les détaillants et coût de transshipment fixe par transaction. Sous ces nouvelles hypothèses, nous reprenons la formulation de la modélisation mathématique puis nous passons au modèle de simulation-optimisation correspondant. Dans un premier temps, nous évaluons les impacts de deux paramètres fondamentaux (délai d'approvisionnement et écarts types des demandes) pour un système à 2, 4 ou 8 détaillants et pour deux politiques de transshipment (complete pooling standard et complete pooling plafonné (i.e. transfert soumis à une quantité maximale par transaction de transshipment)). Dans un deuxième temps et afin de pouvoir multiplier les expérimentations, nous adoptons une nouvelle simplification consistant à rapprocher la politique (R, s, S) par une politique du type $(R, s, s+Q)$. Nous évaluons alors les performances du système en fonction des paramètres de coût et du nombre de détaillants que nous élargissons jusqu'à 12. Nous comparons, cette fois-ci, les résultats du complete pooling standard (selon lequel les transshipments sont effectués de façon systématique chaque fois que les stocks disponibles le permettent) à ceux du complete pooling conditionné par des critères de rentabilité économique de base. Nous terminons par une étude du comportement du système vis-à-vis du taux de service désiré, sans coût de rupture.

- Dans le chapitre 6, nous revenons à une structure à deux détaillants mais multi échelon, dans le sens que le centre de distribution n'est plus considéré à capacité infinie mais doit lui-même gérer l'approvisionnement de son stock et sa répartition entre les deux détaillants. Nous adoptons d'utiliser une politique (R, s, S) pour le centre de distribution et une politique $(R, s, s+Q_r)$ pour les détaillants avec un coût de transshipment fixe par transaction. En cas d'insuffisance de stock disponible chez le centre de distribution, une procédure d'allocation est appliquée pour la satisfaction partielle des commandes des détaillants ; deux variantes sont proposées pour cette procédure. Nous évaluons, sous ces hypothèses, le comportement du système pour trois objectifs différents d'optimisation : minimisation du coût total du système, minimisation du coût total du système sans coût de rupture mais sous la contrainte d'un taux de service global pour les deux détaillants et, enfin, minimisation du coût total du système sans coût de rupture mais sous la contrainte d'un taux de service spécifique pour chaque détaillant.

Dans une conclusion générale, nous dressons un bilan des travaux menés et nous projetons quelques perspectives intéressantes pour leur prolongement.

Guide de notations

Notation	Désignation
K	Coût de commande fixe
Ch	Coût de possession par unité de produit et par période
Cp	Coût de rupture par unité de produit perdue
Ct	Coût de transshipment unitaire ou fixe
Q_{\max}	Quantité maximale de transshipment
L	Délai (en périodes) d'approvisionnement des détaillants à partir du centre de distribution
T	Horizon fini de temps
R	Période de révision
S	Point de commande
S	Niveau de reapprovisionnement de stock
D	Différence entre S et s ; $D=S-s$
Q	Quantité de commande
EOQ	Quantité économique de commande
N	Nombre de détaillants
k	Facteur de sécurité
ss	Stock de sécurité
SD	Taux de service désiré
β^b	Taux de service d'un détaillant sur l'horizon T pour un système indépendant
β^a	Taux de service de l'ensemble des détaillants sur l'horizon T pour un système avec transshipment
s_i^0	Point de commande du détaillant i (solution initiale pour la simulation-optimisation)
S_i^0	Niveau de reapprovisionnement du détaillant i (solution initiale pour la simulation-optimisation)

$IL_{i,t}^b$	Niveau de stock chez le détaillant i à la période t avant le transshipment
$IL_{i,t}^a$	Niveau de stock chez le détaillant i à la période t après le transshipment
$IP_{i,t}^b$	Position de stock chez le détaillant i à la période t avant le transshipment
$IP_{i,t}^a$	Position de stock chez le détaillant i à la période t après le transshipment
$X_{j,i,t}$	Quantité de transshipment du détaillant j au détaillant i à la période t
$TX_{i,t}$	Quantité totale de transshipment vers le détaillant i à la période t
$QR_{i,t}$	Quantité en rupture durant un cycle d'approvisionnement du détaillant i (système sans transshipment)
$QP_{i,t}$	Quantité perdue par le détaillant i à la période t (système avec transshipment)
$B_{i,t}$	Variable booléenne qui prend la valeur 1 si le détaillant i passe une commande au centre de distribution à la fin de la période t et 0 sinon
$\eta_{i,t}$	Variable booléenne qui prend la valeur 1 si le détaillant i a reçu un transshipment à la période t et 0 sinon
$\delta_{i,t}$	Variable booléenne qui prend la valeur 1 si le détaillant i demeure en situation de rupture à la fin de la période t et 0 sinon
$d_{i,t}$	Demande aléatoire chez le détaillant i à la période t qui suit la distribution normale
μ_i	Moyenne de la demande par période chez le détaillant i
σ_i	Écart type de la demande par période chez le détaillant i
$\mu_{i,L+1}$	Moyenne de la demande durant le cycle d'approvisionnement
$\sigma_{i,L+1}$	Écart type de la demande durant le cycle d'approvisionnement
$E(CT)$	Coût total du système
$E(X_{j,i,t})$	Espérance mathématique de la quantité de transshipment depuis le détaillant j vers le détaillant i à la période t , $j \neq i$
$R(s_i)$	Espérance mathématique de la quantité de rupture du détaillant i à la période t (système sans transshipment)
$P(s_i)$	Espérance mathématique de la quantité perdue par le détaillant i à la période t (système avec transshipment)

Les notations s^0 , S^0 , μ , σ , μ_{L+1} et σ_{L+1} (sans l'indice i) sont utilisées dans les formulations mathématiques dans le cas d'un problème de gestion de stock d'un seul site de stockage.

Partie 1

État de l'art

Dans cette partie, nous commençons par présenter une revue de la littérature relative à la gestion des stocks disponibles dans les circuits de distribution au sein des chaînes logistiques, en visant à synthétiser les problèmes posés et les principaux concepts adoptés. Nous enchaînons par les travaux ayant traité de la problématique du transshipment. L'ensemble fera apparaître progressivement et de façon claire la problématique et les orientations des travaux de la thèse.

Chapitre 1 : Chaînes logistiques

1.1 Introduction

1.2 Les flux de la chaîne logistique

1.2.1 Les flux physiques

1.2.2 Les flux d'information

1.2.3 Les flux financiers

1.3 Les structures de chaînes logistiques

1.3.1 Les structures physiques des chaînes

1.3.2 Les modes de pilotage

1.4 Les fondamentaux des réseaux logistiques

1.4.1 L'effet de bullwhip

1.4.2 L'effet \sqrt{n}

1.4.3 Les principes de coopération et de coordination

1.5 Les outils de la collaboration et de la coordination

1.5.1 L'Electronic Data Interchange (EDI)

1.5.2 L'Efficient Consumer Response (ECR)

1.5.3 Le Vendor Managed Inventory (VMI)

1.5.4 Le Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment (CPFR)

1.5.5 L'Available To Promise (ATP)

1.6 Conclusion

1.1 Introduction

De nombreuses définitions de la « chaîne logistique » (on dit aussi, parfois, « chaîne d'approvisionnement ») ont été proposées. Dans la littérature anglo-saxonne, on parle de « supply chain ». Nous citons les définitions les plus fréquemment utilisées :

Définition 1 :

« Un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution du produit fini vers le client » (Lee et Billington 93). C'est la définition la plus fréquemment retenue dans la littérature. Le rapprochement naturel entre la chaîne logistique et un réseau d'installations permet de schématiser de façon très simple n'importe quelle chaîne logistique. La représentation proposée en figure 1.1 fait apparaître les fonctions d'approvisionnement (relation entre fournisseur et producteur), de transformation (par la production des biens) et de distribution (du produit final vers les clients).

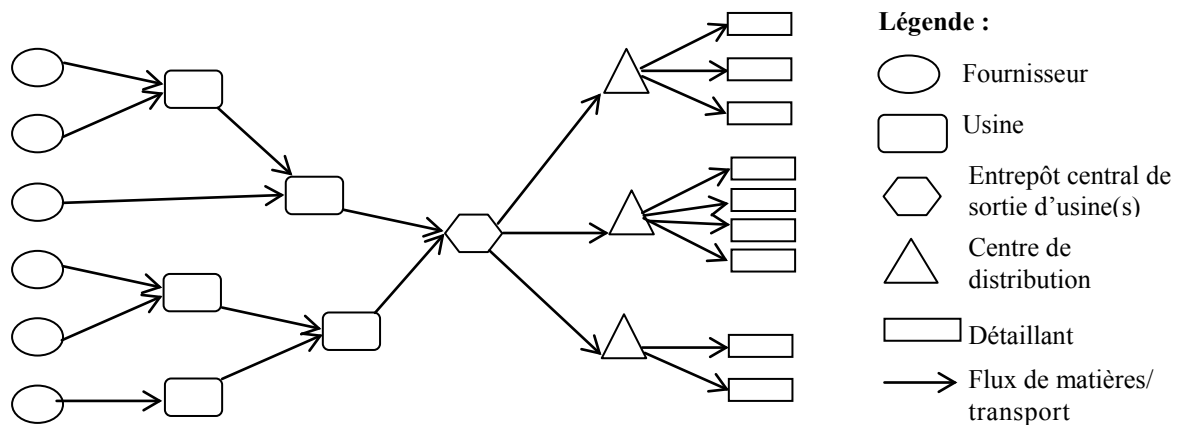


Figure 1.1. Représentation d'une chaîne logistique

Définition 2 :

« Une chaîne logistique est un ensemble de deux ou plusieurs entreprises liées par des flux de marchandises, d'informations et financiers ». (Tsay et al. 99).

Définition 3 :

« La chaîne logistique d'un produit fini se définit comme l'ensemble des entreprises qui interviennent dans les processus d'approvisionnement en composants, de fabrication, de distribution et de vente du produit, du premier des fournisseurs au client ultime » (Rota-Franz et al. 01).

Ces définitions mettent en exergue les points essentiels suivants :

- Une chaîne logistique se définit par rapport à un produit fini ou un ensemble de produits.
- Une chaîne logistique fait intervenir au moins deux entreprises.
- Les entreprises sont liées par trois types de flux : des flux de matières, des flux d'informations et des flux financiers.

On peut aussi distinguer plusieurs logistiques qui diffèrent par leur objet et leurs méthodes :

- Une logistique d'approvisionnement : qui permet d'amener dans les usines les produits de base, composants et sous-ensembles nécessaires à la production ;
- Une logistique de production : qui consiste à apporter aux lignes de production des matériaux et composants nécessaires à la production et à planifier la production ;
- Une logistique de distribution : qui consiste à apporter au consommateur final, soit dans les grandes surfaces commerciales, soit chez lui, les produits dont il a besoin ;
- Une logistique de soutien : qui consiste à organiser tout ce qui est nécessaire pour maintenir en opération un système complexe, y compris à travers des activités de maintenance ;
- Une logistique inverse (reverse logistics) : qui consiste à reprendre des produits dont le client ne veut pas ou qu'il veut faire réparer, ou encore à traiter des déchets industriels, emballages, produits inutilisables.

Nous nous intéressons, dans ce mémoire, à la logistique de distribution dans laquelle les membres constituant le réseau coopèrent dans la distribution d'un même produit.

1.2 Les flux de la chaîne logistique

Comme nous l'avons mentionné auparavant, les entreprises appartenant à une même chaîne logistique sont reliées par trois flux : des flux physiques, des flux d'informations et des flux financiers (cf. Figure 1.2).

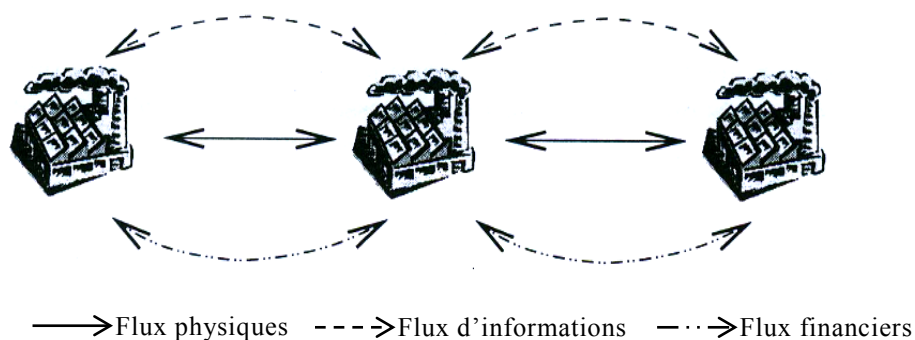


Figure 1.2. Les différents flux d'une chaîne logistique (Pimor 03)

1.2.1 Les flux physiques

Les flux physiques se présentent sous forme de déplacements des produits (ou matières). L'hypothèse fondamentale est que ces flux s'effectuent majoritairement du fournisseur vers le client. Une entreprise admet souvent plusieurs circuits de distribution pour un même produit ou pour des produits différents. Il s'agit de circuits classiques grossistes - détaillants, grande distribution, etc. Par exemple, l'entreprise peut livrer à partir de plusieurs entrepôts ; elle peut livrer un autre entrepôt ou une plate-forme de distribution ou une surface de vente, voire le consommateur final directement en vente par correspondance. Selon cette structure, la

chaîne logistique peut être considérée comme une arborescence. On distingue globalement deux sortes de nœuds dans l'arborescence :

- Les entrepôts centraux, points d'accumulation de produits où ceux-ci sont stockés en plus ou moins grande quantité et pour une certaine durée ;
- Les entrepôts intermédiaires, points de croisement « break-bulk » où les produits sont réceptionnés puis livrés immédiatement à plusieurs distributeurs ou plusieurs surfaces de vente (ou détaillants).

Dans certains cas particuliers, par exemple celui d'une relation de sous-traitance, les flux physiques peuvent circuler dans le sens inverse, i.e. du donneur d'ordre vers le sous-traitant, ou dans les deux sens.

1.2.2 Les flux d'information

A côté des flux de produits, la gestion de la chaîne logistique demande de traiter des informations nombreuses qui, pour une part importante d'entre elles, remontent la chaîne en sens inverse des produits. Ces flux peuvent être distingués en deux types : les flux de décisions et les flux de données. Les flux de décisions peuvent correspondre aux commandes des distributeurs, aux ordres de fabrications, aux commandes des produits de base et composants, etc. Les flux de données sont les informations qui précèdent ou accompagnent les produits : avis d'expédition, bons de livraison, prévisions de besoins, etc. Les flux d'informations peuvent donc être bidirectionnels au vu de ces deux exemples.

1.2.3 Les flux financiers

Ces flux regroupent les paiements et les arrangements financiers divers (crédits, mensualisation des paiements, etc.) entre les clients et les fournisseurs. Ils sont aussi bidirectionnels.

On peut donc définir la gestion de la chaîne logistique comme le pilotage de ses flux et la gestion de ses stocks à travers l'exploitation (informatisée) de l'ensemble des informations afin d'obtenir un niveau de performance désiré et à coût optimisé.

1.3 Les structures de chaînes logistiques

Dans la littérature, les chaînes logistiques sont étudiées selon deux aspects. Le premier concerne la structure physique des chaînes logistiques et le deuxième s'intéresse à leurs modes de pilotage.

1.3.1 Les structures physiques des chaînes

Les structures de base rencontrées dans la littérature, sur lesquelles sont basées les modélisations existantes, se présentent comme suit :

1.3.1.1 Structure série

Dans cette structure, chaque site a au plus un prédécesseur et/ou un successeur (cf. Figure 1.3). La chaîne logistique en série est très étudiée, en particulier, dans les systèmes d'assemblage, mais peu abordée dans les systèmes de distribution (Axsäter 03c). La structure en série correspond aussi à un procédé de fabrication linéaire.

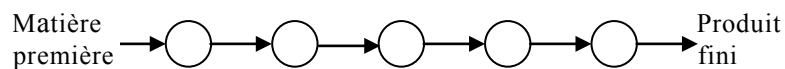


Figure 1.3. Chaîne logistique série (Axsäter 03c)

1.3.12 Structure dyadique

Cette structure peut être vue comme un cas particulier d'une chaîne en série limitée à deux échelons. Cette structure est fréquemment étudiée dans les relations client/fournisseur ou donneur d'ordre/sous-traitant.

1.3.13 Structure convergente

Cette structure apparaît dans les systèmes d'assemblage où chaque nœud a au plus un successeur.

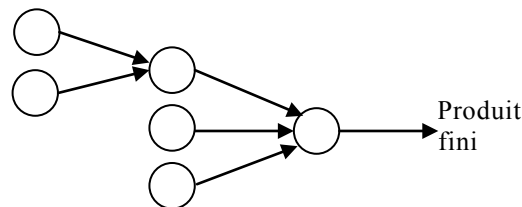


Figure 1.4. Chaîne logistique convergente (Silver et al. 98)

1.3.14 Structure divergente

On trouve cette structure, le plus souvent, dans les systèmes de distribution où chaque installation de la chaîne logistique a au plus un prédécesseur (cf. Figure 1.5). Les travaux s'y rapportant se sont focalisés, en particulier, sur l'étude de la localisation des sites de distribution et leur dimensionnement.

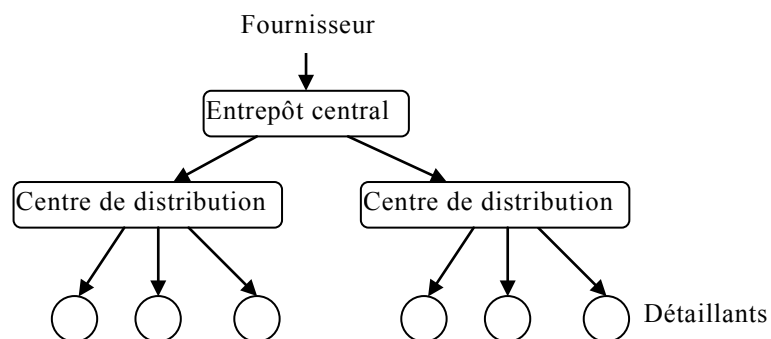


Figure 1.5. Chaîne logistique divergente (Silver et al. 98)

1.3.15 Structure réseaux

En pratique, les chaînes logistiques sont multi niveaux et une installation d'un niveau donné peut avoir plusieurs prédécesseurs et/ou plusieurs successeurs (cf. Figure 1.1). Cette structure peut être vue comme une composition de structures convergente, divergente et série. Elle permet de prendre en compte des chaînes logistiques complexes.

Notre étude s'intéresse à une structure divergente, correspondant à un système de distribution. C'est sur la base de cette structure que nous développerons, dans les chapitres 4 à 6, une modélisation fine de notre problématique.

1.3.2 Les modes de pilotage

Le pilotage des chaînes logistiques se décline suivant deux dimensions principales : information locale versus globale et décision centralisée versus décentralisée. L'information locale implique que chaque site voit la demande uniquement à travers les commandes qui lui parviennent de ses clients directs. De plus, chaque site a seulement la visibilité de l'état de son stock, de ses coûts et de ses paramètres propres. L'information globale implique que le décideur a la visibilité de la demande, des coûts et de l'état de stock de tous les sites dans le système. La gestion centralisée vise une optimisation globale du système entier ; elle est souvent identifiée comme un système à flux poussé, l'échelon supérieur poussant les produits vers les lieux de consommation (Pyke et Cohen 90). La gestion décentralisée implique que les décisions sont prises séparément au niveau de chaque site ; elle est identifiée comme un système à flux tiré par les consommateurs (Silver et al. 98). Les meilleures solutions sont obtenues avec l'information globale et la décision centralisée parce que les décisions sont faites avec la visibilité du système entier utilisant l'information de tous les sites. Cependant, ces solutions nécessitent des mécanismes fiables de coopération et de coordination entre les sites et ne peuvent pas généralement être mises en œuvre dans le cadre de chaînes logistiques impliquant plusieurs entités juridiquement et financièrement indépendantes.

1.4 Les fondamentaux des réseaux logistiques

1.4.1 L'effet de bullwhip

Une des caractéristiques d'une chaîne logistique est que plus l'on s'éloigne du consommateur final (vers l'amont) et plus la variabilité des commandes augmente (Pimor 03). Cela est dû au fait que chaque maillon de la chaîne est censé réagir aux variations (positives ou négatives) constatées sur la demande en aval et les amplifier en transmettant les commandes vers l'amont. En l'exagérant pour bien mettre en évidence, ce phénomène peut être schématisé comme suit : quand surviennent de petites modifications de la demande finale, les commandes des détaillants aux grossistes deviennent très fluctuantes, les commandes des grossistes aux fabricants deviennent chaotiques et le fabricant passe une partie de son temps en chômage technique et une autre à essayer de produire des quantités importantes. Ce phénomène est appelé « effet coup de fouet » (bullwhip effect, dans la littérature anglo-saxonne).

1.4.2 L'effet \sqrt{N}

Cette caractéristique est aussi importante que l'effet bullwhip. L'effet \sqrt{N} découle du principe statistique de proportionnalité de la variance et non de l'écart type : la variabilité d'une demande regroupée n'est pas proportionnelle au nombre d'unités regroupées mais à la racine de ce nombre (Pimor 03) :

- Lorsque N entrepôts identiques ont chacun un stock de sécurité ss , le fait de les rassembler demande pour le même niveau de service un stock de sécurité de $ss\sqrt{N}$ et non de $ss*N$.
- Lorsque la variabilité de la demande pour une période de temps est σ et qu'elle impose un stock de sécurité ss , la variabilité pour N périodes de temps n'est pas $\sigma*N$ mais de $\sigma\sqrt{N}$ et elle n'impose qu'un stock de sécurité de $ss\sqrt{N}$ pour le même niveau de service.

1.4.3 Les principes de coopération et de coordination

Coopération et coordination sont deux aspects inhérents au développement des activités des entreprises.

La coopération signifie travailler ensemble à l'exécution d'une ou de plusieurs actions pour produire un résultat final. Le terme collaboration s'utilise à la place de coopération lorsque les actions individuelles ne sont pas différenciables. D'après (de Terssac et Maggi 96), la coopération peut être définie comme des actions à objectifs définis et développées collectivement pour dépasser les propres limites individuelles.

La coordination vise à synchroniser les actions dans le temps en exploitant un référentiel temporel commun et à gérer la cohérence des actions individuelles par rapport à l'ensemble des activités. D'après (Thomassen et Lorenzen 01), la coordination peut être vue comme une mise en cohérence des actions des agents qui entreprennent différentes activités, réduisant au minimum les coûts de division de travail.

1.4.31 La coopération

Dans la littérature, nous avons recensé quatre types de relations de coopération, à savoir :

- *Relations de coopération verticales* : elles sont généralement analysées du point de vue des échanges producteurs-utilisateurs, ou des contrats de sous-traitance passés entre donneurs d'ordres et des entreprises généralement de moindre importance.
- *Relations de coopération horizontales* : elles sont bâties entre concurrents ayant décidé de collaborer ensemble pour atteindre un objectif commun. Elles peuvent concerner aussi bien des relations entre partenaires positionnés sur des marchés différents que des liaisons entre concurrents directs.
- *Relations de coopération diagonales* : les partenaires de ces relations ne sont ni des concurrents, ni des acteurs successifs de la chaîne. Ils sont liés, par exemple, par une coopération dans le domaine de la recherche technologique.

Si l'on s'accorde sur l'apport avantageux d'une telle relation de coopération, il semble indispensable de mentionner les pré-requis nécessaires à sa réussite.

Une vision gagnant – gagnant des relations : Il y a donc une volonté de faire mieux ensemble et de partager les bénéfices.

Un comportement coopératif : cela implique la mise en œuvre d'actions concertées, le partage d'informations, l'existence de mécanismes conjoints de prise de décision, l'existence de mécanismes de résolution de conflits et une restriction de l'utilisation du pouvoir.

Dans notre étude, la coopération est assimilée à une action d'entraide (transvasement de stock) en vue de réduire (voire d'éliminer complètement) la rupture chez des détaillants se situant au même échelon du système de distribution. L'objectif est de répondre aux demandes des clients (quantité et délai souhaités) en assurant un taux de service minimum. On parle de « transshipment latéral ». Dans la littérature, on trouve aussi la mise en œuvre du transshipment latéral dans les systèmes de production.

1.4.32 La coordination

L'amélioration de la performance d'une entreprise peut se traduire par une plus grande coordination des activités distribuées, en interne dans l'entreprise (processus de production) et en externe chez les fournisseurs (livraison des matières premières) et chez les distributeurs (adéquation de la commande passée et de la livraison effective). Selon les stades logistiques, on trouve trois catégories de coordination :

Coordination entre acheteur et vendeur : le but est d'ajuster la quantité économique de commande qui optimise les gains totaux des deux parties (cas du problème de newsboy).

Coordination entre la production et la distribution : le but est de trouver, par exemple, le lot de production et/ou de transport, le mode de transport, le programme de production et de transport, etc., qui minimise(nt) les coûts totaux de production et de distribution.

Coordination entre stockage et distribution : ici, on cherche plutôt à déterminer les politiques de stockage (niveaux des stocks, quantité de commande, période de commande) pour les différents sites d'un système de distribution multi échelons.

Nos travaux de recherche, dans le chapitre 6, s'inscrivent dans la dernière catégorie et portent sur l'étude de la distribution des stocks entre un centre de distribution et des détaillants et entre les détaillants eux-mêmes.

Dans la section suivante, nous présentons les méthodes développées pour favoriser les collaborations inter-entreprises.

1.5 Les outils de la coopération et de la coordination

1.5.1 L'Electronic Data Interchange (EDI)

L'EDI se traduit en français par échange de données informatisé. La gestion des flux d'information tout au long de la chaîne logistique s'effectue par l'intermédiaire de l'informatisation des données. Ces systèmes d'échanges de données permettent aux différents éléments de la chaîne logistique (fournisseur, entreprise, distributeur, transporteur) d'échanger des informations. Les prévisions, les informations concernant les demandes et les productions sont partagées sur les réseaux informatisés (Lasnier 04). L'EDI permet de coordonner et d'optimiser l'organisation et le fonctionnement des différentes entreprises partenaires.

1.5.2 L'Efficient Consumer Response (ECR)

L'ECR se traduit en français par réponse efficace au consommateur. L'ECR vise à rationaliser la chaîne de distribution de manière à augmenter la valeur apportée aux clients tout en limitant les coûts inhérents à cette rationalisation. Les deux objectifs principaux sont les suivants :

- La réduction des coûts : il s'agit d'un travail d'identification des dysfonctionnements entre distributeur et producteur qui vont étudier les possibilités d'économie commune par des actions d'amélioration ;
- La dynamisation commerciale : l'idée première est d'évoluer d'une logique de coûts à une logique de gain entre producteur et distributeur. On cherche à aller au-delà de la coopération logistique (par exemple, introduction de nouveaux produits).

1.5.3 Le Vendor Managed Inventory (VMI)

Le VMI se traduit en français par la gestion partagée d'approvisionnement. Selon cette stratégie, c'est le fournisseur (ou le producteur) qui gère les stocks de produits chez le client (ou le distributeur) et ainsi les décisions d'approvisionnement sont prises par le fournisseur et non plus par le client. Cette stratégie suppose que le fournisseur a un accès aux stocks de produits et aux ventes ou prévisions de ventes chez le client afin de définir une politique d'approvisionnement cohérente vis-à-vis de la consommation (Bertazzi et al. 05).

Bien entendu, l'application du VMI nécessite le partage d'informations, la coordination et l'intégration des processus entre les acheteurs et les fournisseurs. Généralement, les acheteurs partagent avec les fournisseurs, au moins, les informations sur la demande et sur les stocks afin de permettre aux fournisseurs de gérer leur approvisionnement (Yao et al. 07).

1.5.4 Le Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment (CPFR)

Il s'agit là d'une méthode de gestion partagée des prévisions de ventes et des programmes d'approvisionnement en utilisant la technologie Internet. L'objectif du CPFR est de conduire les partenaires d'une chaîne logistique à partager leurs informations pour définir des plans plus ajustés qui peuvent tenir compte d'informations détenues localement. Ce partage d'informations permet de réduire les

coûts. En fait, le rôle du CPFR n'est pas limité à l'approvisionnement mais concerne des liens plus profonds tels que la planification des ventes, opérations promotionnelles collaboratives, développement collaboratif de produits, etc.

1.5.5 L'Available To Promise (ATP)

1.5.5.1 Le principe d'ATP

L'ATP (que l'on peut traduire par "disponible à promettre (aux clients)") est une fonction du service clientèle qui consiste à gérer les réponses aux requêtes de commande des clients. Initialement, l'ATP était conçu pour servir dans un contexte de production à flux poussé, donc production de masse planifiée à long et moyen termes sur la base de prévisions de ventes et pour des types limités de produits. L'ATP conventionnel se contentait alors de prendre ses décisions en s'appuyant sur les informations se rapportant aux stocks disponibles et aux quantités prévues par le programme directeur de production (MPS) (Ball et al. 00).

Plus tard, l'évolution de la compétitivité, en poussant vers la production simultanée de petites et moyennes séries de produits diversifiés, a développé la tendance vers la production à la commande et, du coup, a donné à l'ATP un rôle beaucoup plus important qui est de conjuguer les avantages d'une commercialisation à flux tiré à ceux d'une production à flux poussé aménagé. Dans cette évolution, le disponible à promettre devient la quantité résiduelle en stock à laquelle s'ajoute le "surplus possible" de production non engagé par des commandes ; l'ATP intervient donc pour écouler ce disponible. De plus, l'entreprise, tout en jouant la compétitivité en centrant son attention sur la satisfaction des clients (fiabilité des engagements pour une qualité de service qui tient compte de l'importance du client), substitue l'objectif classique de la "minimisation des coûts" par celui de la "maximisation des profits" et donne à une ATP "avancée" les prérogatives d'intervenir pour allouer et réallouer les ressources disponibles – matière première, en-cours, produits finis, capacités de production et de distribution – afin d'œuvrer dans ce sens. Ce faisant, l'ATP peut prendre en compte les fluctuations des commandes, les défaillances des approvisionnements et la flexibilité et les aléas de la capacité de production (Chen et al. 01 ; Xiong et al. 03 ; Kilger et Schneeweiss 00 ; Jeong et al. 02 ; Clay 90 ; Veramani et Joshi 97).

D'une façon générale, les requêtes de commande client invoquent des spécifications sur deux dimensions : "quantité" et "date de livraison" ; elles varient selon les marges de flexibilité qu'elles autorisent. Les algorithmes de gestion de l'ATP sont principalement classés en fonction de leur adaptation aux trois cas suivants de requêtes clients (Chen et al. 01) :

- *Quantity quoting* : marge de flexibilité sur la quantité (intervalle pour quantité acceptable) mais date due précise ;
- *Due-date quoting* : quantité précise mais marge de flexibilité sur la date due (fenêtre de temps) ;
- *Quantity and due-date quoting* : marges de flexibilité spécifiées pour la quantité et pour la date due.

L'ATP réagit aux requêtes en fonction du "disponible", soit en s'engageant à honorer la commande en précisant ses paramètres, soit en proposant des recommandations pour ajustement de requête.

Soulignons, enfin, que la compétitivité plaide pour des réactions aux requêtes clients en temps réel, tandis que l'optimisation s'obtient plutôt avec un traitement par lots (batch ATP). Une des voies de compromis consiste à décider de la réponse aux requêtes en temps réel et d'optimiser l'exécution des engagements en traitant les requêtes par lots.

1.5.52 Les modèles ATP

Ball et al., dans (Ball et al. 00, 02), ont classifié les principaux modèles d'ATP comme suit :

- Real ATP : une quantité engagée et/ou date due sont déterminées à temps réel pour la requête du client.
- Batch ATP : les requêtes clients sont collectées en groupes (batch) et sont traitées ensemble pour déterminer les quantités et/ou les dates engagées.
- Distribution ATP (d-ATP) : considère un réseau de distribution englobant les centres de distribution et les détaillants.
- Make ATP (m-ATP) : considère un réseau de distribution et un réseau de production
- Supply chain ATP (sc-ATP) : considère la supply chain entière incluant un réseau de distribution, un réseau de production et un réseau de fournisseurs.
- ATP à flux poussé : se base sur les prévisions de demandes futures. Elle permet d'augmenter l'efficacité de la production, d'améliorer la stabilité et de réduire le temps de réponse aux clients. Il s'agit de Make to Stock (MTS).
- ATP à flux tiré : sert à répondre directement aux commandes clients. Elle permet de réduire les stocks, d'améliorer la flexibilité et de répondre directement aux besoins des clients. On trouve : Make To order (MTO) et Assemble To order (ATO) et Configure To order (CTO).
- ATP à flux poussé-tiré : elle permet la coordination entre la demande et l'approvisionnement.

1.6 Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les caractéristiques de base des chaînes logistiques ainsi que les concepts de collaboration et de coordination au sein d'une structure multi échelons. A partir de cette étude, nous avons pu positionner la thèse dans la structure divergente multi échelons (ou réseau de distribution). Le regard avec lequel est abordé le réseau de distribution concerne essentiellement la gestion des stocks et le transshipment pour améliorer le taux de service à moindre coût. De plus, nous avons mis l'accent sur les nouvelles stratégies de la chaîne logistique concernant la problématique de la gestion de stock.

Nous exposons, dans le chapitre suivant, les problèmes de gestion de stock dans les structures un échelon et multi échelons ainsi que les méthodes de résolution abordées pour de tels problèmes.

Chapitre 2 : Les méthodes de gestion de stock dans les structures un(multi) échelon(s)

2.1 Le système de stock

2.2 Coûts des stocks

2.3 Structure à un échelon

2.3.1 Terminologie des stocks

2.3.2 L'importance de l'article : classification ABC

2.3.3 Révision continue versus révision périodique

2.3.4 Les politiques de gestion des stocks

2.4 Les difficultés de la politique de gestion (R, s, S)

2.4.1 La notion de l'undershoot

2.4.2 Caractéristiques de la fonction coût

2.5 Objectifs spécifiés : coût et service

2.5.1 Présentation

2.5.2 Les taux de service

2.6 Modélisation théorique de stock et calcul de stock de sécurité

2.6.1 Caractéristiques de la demande

2.6.2 Heuristiques pour la politique (s, Q)

2.6.3 Heuristique pour la politique (R, S)

2.6.4 Heuristiques pour la politique (R, s, S)

2.7 Structure multi échelons

2.7.1 Les problèmes liés aux systèmes de stock multi échelons

2.7.2 Types d'un système arborescent

2.8 Conclusion

2.1 Le système de stock

Les stocks sont indispensables au bon fonctionnement des activités de l'entreprise. Il est donc nécessaire de les gérer. D'après (Dupont, 1998), il existe deux définitions de base pour le stock :

- l'ensemble des marchandises disponibles sur un marché ou dans un magasin ;
- l'ensemble des marchandises disponibles, matières premières, produits semi-finis, finis, etc. qui sont la propriété d'une entreprise.

La première définition concerne plus spécifiquement les entreprises de distribution. On parle alors des stocks de distribution qui sont l'ensemble des produits finis situés dans le système de distribution lui-même. Ce type de système est confronté à des problèmes critiques tels que la politique de vente des marchandises aux clients, les problèmes de distributions, etc. La seconde définition concerne les entreprises de fabrication. Au sein de ces entreprises, on trouve quatre types de stocks : les matières premières, les encours, les produits finis et les pièces détachées, de rechange et de maintenance.

Quel que soit le type d'entreprise, l'objectif de la gestion des stocks est de minimiser le coût de stockage tout en conservant un taux de service désiré.

Nous nous intéressons, dans ce chapitre, à la littérature relative au système de distribution. Si l'on se restreint à une entreprise de distribution, le système de stock se définit à partir de quatre composantes essentielles : le produit, le fournisseur, le stock et le client. Le produit est acheté chez le fournisseur, stocké dans l'entreprise, puis fourni au client. Nous allons nous focaliser sur les aspects importants liés à chacune de ces composantes, car ce sont les hypothèses caractérisant ces composantes qui déterminent la structure et la complexité des systèmes.

Nature du produit : La durée de vie du produit est un facteur important qui influence la manière dont le stock sera géré. En effet, un produit périssable ou à obsolescence rapide est géré de manière différente d'un produit à durée de vie longue. On trouve aussi les produits irréparables, réparables et les pièces de rechanges.

Délai d'approvisionnement : Le facteur essentiel dans les relations avec le fournisseur est le délai d'approvisionnement, i.e. le laps de temps qui s'écoule entre la commande et la réception du produit. La manière de prendre en compte ce délai d'approvisionnement a une grande influence sur la complexité des modèles. L'hypothèse la plus simple est de considérer ce délai comme étant nul ; l'approvisionnement sera dit instantané (Scarf 59, 05). Il s'agit d'une hypothèse extrême et peu réaliste. Dans la littérature comme dans la pratique, l'hypothèse la plus généralement retenue est celle d'un délai constant et connu avec certitude (Zheng 92). Peu de modèles supposent un délai aléatoire (Ehrhardt 84; Kaplin 70), du fait des problèmes théoriques complexes que de telles hypothèses peuvent engendrer.

Structure de stockage : On appelle structure de stockage la manière dont les sites qui stockent le produit sont organisés. On distingue les structures à un échelon et les structures multi échelons. Une structure est dite à un échelon si le même site reçoit le produit du fournisseur et le délivre aux clients. A l'opposé, dans une structure multi

échelons, un site intermédiaire, souvent appelé centre de distribution, reçoit le produit d'un fournisseur externe et le transfère à la demande vers d'autres sites, qui, eux-mêmes, peuvent servir d'autres sites et ce, jusqu'aux sites finaux (détaillants) qui fournissent directement les clients. La prise en compte d'une telle structure augmente considérablement la complexité du modèle de gestion.

Comportement du client en cas de rupture : Dans une situation de rupture, une demande liant peut avoir deux suites :

- *Demande différée* : pour un vendeur, une demande est différée lorsque le client accepte d'attendre la prochaine livraison pour obtenir un article manquant. Pour l'entreprise, cela signifie que l'on ponctionnera les manquants sur la prochaine livraison. Cette situation correspond à un marché captif.
- *Demande perdue* : pour un vendeur, une demande est perdue si le client va chercher ailleurs l'article manquant. Pour l'entreprise, cela signifie que le rattrapage ne peut être fait que par la mise en place d'une procédure d'exception (par exemple, une procédure d'approvisionnement d'urgence) et qu'on n'utilisera pas la prochaine livraison pour palier la rupture. Cette situation est très fréquente dans la relation détaillant-client. Aussi, on distingue les demandes perdues partiellement (i.e. il y a satisfaction partielle à hauteur du stock disponible, le reste de la demande est perdu) et les demandes perdues totalement (i.e. la demande est satisfaite dans sa totalité ou elle est perdue).

Dans la pratique, il y a une combinaison de ces deux extrêmes. Cependant, la plupart des modèles de stock ont été développés pour l'un ou l'autre de ces extrêmes. Rares sont les modèles qui ont étudié cette combinaison (Kim et Park 85).

2.2 Coûts des stocks

En général, pour déterminer les politiques de gestion, on classe les coûts en trois catégories : les coûts de commande, les coûts de possession et les coûts de rupture.

- *Les coûts de commande* (ou coûts d'acquisition) : ils englobent tout ce qui est lié aux frais de commande et de livraison. Ils incluent, donc, le coût de passation des commandes, les coûts de transport et de livraison entre fournisseur et entreprise et les coûts encourus à la réception de la commande.
- *Les coûts de possession* (ou coûts de stockage) : ce sont les coûts relatifs au fait de garder des produits en stock pendant un certain temps dans l'entreprise. Ces coûts ont pour origine, d'une part, un coût financier lié à l'immobilisation d'actifs non productifs (à ce coût il faut ajouter un risque financier lorsque le produit stocké peut être détérioré ou perdre tout ou partie de sa valeur commerciale (obsolescence)) et, d'autre part, un coût de stockage proprement dit, lié aux activités à mettre en œuvre pour assurer la manutention, la conservation, l'entreposage et la mise à disposition des produits.
- *Les coûts de rupture* (ou coûts de pénurie) : ces coûts sont les plus délicats à cerner et à estimer. Une rupture de stock entraîne une baisse du service au client final de l'entreprise. Deux cas sont à considérer, celui des demandes perdues et celui des demandes différées. Dans le cas des demandes perdues, le coût de rupture représente un manque à gagner. Dans le cas des demandes différées, le coût de rupture traduit principalement des charges supplémentaires supportées par l'entreprise (pénalités client, frais d'envois multiples et en urgence...) ainsi que l'impact sur son image de marque.

Diverses techniques sont utilisées pour limiter les retards et les ruptures :

- mise en œuvre de procédures d'approvisionnement d'urgence (livraison spéciale) ;
- remplacement d'une pièce par une pièce plus coûteuse (substitution), mais sans augmentation du prix de vente ;
- mise en œuvre de procédures de transshipment latéral d'urgence à partir d'une entreprise se situant au même échelon.

2.3 Structure à un échelon

2.3.1 Terminologie des stocks

2.3.1.1 Principes et fonctionnement

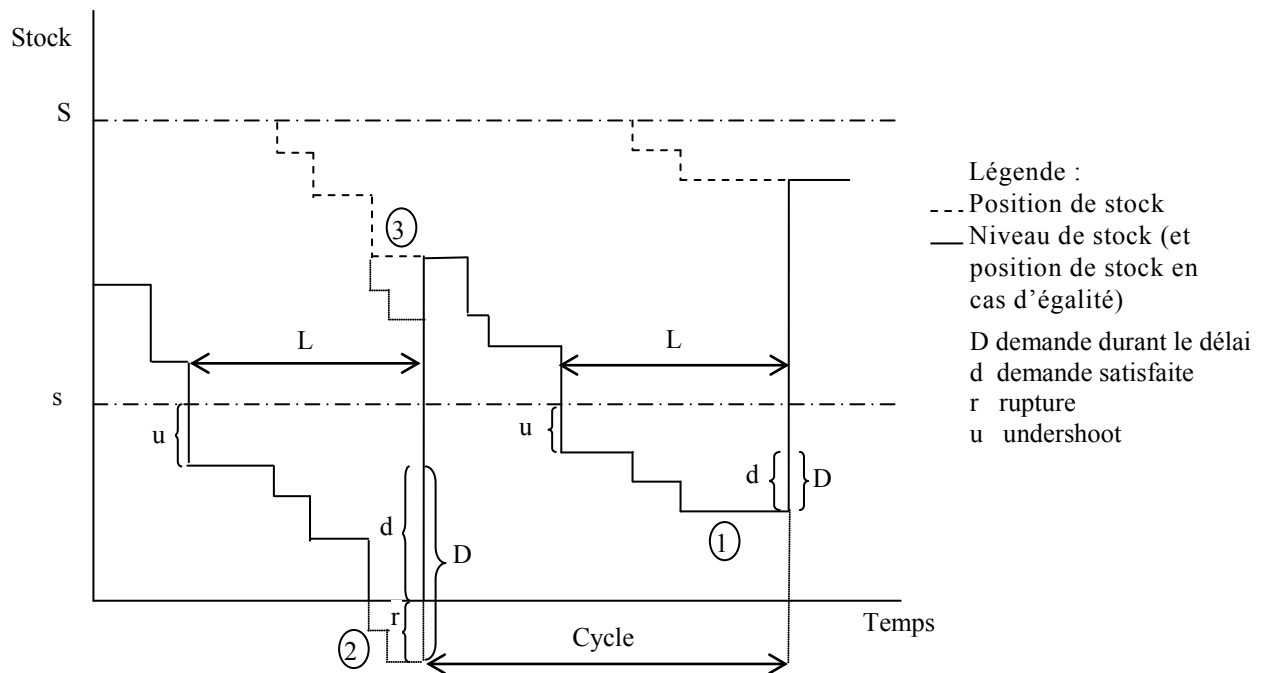
Notons qu'au sens de la gestion de stock, un stock peut être positif ou négatif. En outre, la demande peut avoir un caractère déterministe ou probabiliste. Dès lors, on peut catégoriser les stocks comme suit :

- *Stock disponible* : il s'agit du stock physique réel ; il n'est jamais négatif. Cette quantité est la seule à considérer lorsque l'on étudie la possibilité de satisfaire une demande immédiate.
- *Stock net* : le stock net est défini par la relation suivante : $\text{Stock net} = \text{stock disponible} - \text{demandes différées}$. Cette quantité est donc égale au stock disponible tant qu'il n'y a de demandes différées (cf. Figure 2.1 : cas 1) et devient négative dès que l'on a des demandes différées (cf. Figure 2.1 : cas 2). Dans le contexte des demandes perdues partiellement, la première demande qui provoque la rupture place le stock net à la valeur zéro. Celui-ci restera à zéro jusqu'à l'arrivée de l'approvisionnement suivant (cf. Figure 2.1 : cas 3).
- *Position de stock* : la position de stock est définie par la relation suivante : $\text{Position de stock} = \text{stock net} + \text{quantité en commande}$. La position de stock est la quantité sur laquelle repose la décision de déclenchement d'approvisionnement.
- *Stock de sécurité* : le stock de sécurité est défini comme étant le stock minimum à entretenir en permanence. Dès qu'il y a présence de comportements aléatoires de certains paramètres (demande, délai d'approvisionnement), il y a un risque de rupture de stock. Pour prévenir ce risque, le gestionnaire prévoit un stock de sécurité. La valeur quantitative du stock de sécurité dépend, en particulier, du contexte de demande différée ou perdue (plus de détails dans la section 2.6).

2.3.1.2 Système de décision avec demandes probabilistes

La définition d'un système de gestion d'approvisionnement résulte de la réponse aux questions suivantes :

- 1- Quelle est l'importance de l'article ?
- 2- Le stock est-il contrôlé de manière continue ou périodique ?
- 3- Quelle politique de stock doit être retenue ?
- 4- Quels objectifs en termes de coût ou de service doivent être fixés ?



Cas 1 : pas de rupture, Cas 2 : rupture est différée, Cas 3 : rupture est perdue

Figure 2.1. Différence entre les systèmes de demande différée/perdue (Archibald 81)

Avec les demandes probabilistes, les réponses sont très difficiles à obtenir. En fait, la demande probabiliste complexifie la modélisation. Geunes et al. (Geunes et al. 01) indiquent que deux éléments clés conditionnent la complexité des modèles de stocks : (i) la nature de la demande durant le délai d'approvisionnement et (ii) l'horizon de temps sur lequel porte l'analyse du coût de stock. La demande durant le délai peut être déterministe ou stochastique et continue ou discrète. L'horizon de temps peut être une période unitaire, un nombre fini de périodes ou infini. Des combinaisons de ces deux éléments clés résultent en un ensemble de modèles avec différents degrés de complexité.

Nous présentons, dans ce qui suit, les principales caractéristiques de la demande client rencontrées dans la littérature aussi bien que dans la pratique. En général, on considère l'historique de la demande passée pour définir et paramétrer une politique d'approvisionnement ; le passé est vu comme une bonne appréciation de la demande future. L'hypothèse la plus simple est de considérer la demande connue et constante dans le temps, par exemple, le modèle déterministe de Wilson (Wilson 34). Cependant, cette hypothèse n'est pas applicable dans le monde réel. Ainsi, pour améliorer le réalisme des modèles, on distingue des demandes déterministes dynamiques (Herer et Tzur 03) et des demandes aléatoires connues en lois statistiques classiques. En ce qui concerne les lois statistiques, la demande est généralement approximée par la loi normale si elle est élevée ou par la loi de Poisson lorsqu'elle est faible. Bien que ces deux lois sont les plus fréquemment utilisées, bien d'autres peuvent être envisagées, par exemples, la loi binomiale négative (Wagner et al. 65 ; Schneider et Ringuest 91), la loi géométrique (Wagner et al. 65 ; Johnson 68), la loi de Bernoulli (Johnson 68) et la loi uniforme (Herer et Tzur 03).

Les réponses aux quatre questions posées ci-dessus sont présentées dans les sections suivantes.

2.3.2 L'importance de l'article : classification ABC

Comme les articles ne sont pas tous de même nature et ne font pas l'objet d'une même demande, il est nécessaire de les gérer de manière différente. Pour cela, on effectue souvent, en pratique, une classification des stocks suivant la méthode ABC. Les articles stratégiques sont identifiés par la classe A, on applique à cette classe des méthodes de gestion évitant de générer des ruptures de stock. Pour cette classe, toute rupture peut être critique. Les deux autres classes B et C permettent d'identifier les articles moins stratégiques. Ainsi, la classe B correspond à la classe intermédiaire et la classe C aux articles de faibles coûts n'ayant pas, en cas de rupture, des conséquences analogues à celles de A. La méthode ABC repose sur la loi dite des 80-20 ou loi de Pareto. Selon cette classification on trouve que :

- environ 80% de la valeur de consommation correspond à environ 20% des articles (classe A) ;
- environ 15% de la valeur de consommation correspond à environ 20% des articles (classe B) ;
- environ 5% de la valeur de consommation correspond à environ 60% des articles (classe C).

2.3.3 Révision continue versus révision périodique

Les révisions continue et périodique se distinguent dans la spécification de l'intervalle de révision (R). L'intervalle de révision est le temps qui s'écoule entre deux moments consécutifs dans lesquels on connaît le niveau de stock. Un cas extrême est la révision continue : $R=0$, ce qui équivaut à dire que l'état de stock est toujours connu. En réalité, la surveillance continue n'est pas toujours requise ; chaque transaction (expédition, réception, demande, etc.) fait l'objet d'une mise à jour de l'état de stock. Par contre, dans la révision périodique, l'état de stock est considéré connu seulement chaque R périodes de temps.

Pour illustrer les différences entre ces deux types de révision, considérons l'exemple d'articles pouvant être achetés auprès d'un même fournisseur, ou expédiés par le même mode de transport. Dans ce cas, la coordination des approvisionnements en associant un même intervalle de révision à ces articles peut être intéressante. A l'opposé, avec la révision continue, un ordre d'approvisionnement peut être effectué à tout moment.

Ainsi, la révision continue peut être plus coûteuse pour des articles « fast moving » où il y a plusieurs transactions par unité de temps. Par contre, pour les articles « slow moving », les coûts de commande effectués par la révision continue sont faibles parce que les mises à jour sont faites seulement quand une transaction se produit.

L'avantage majeur de la révision continue est qu'elle entraîne un stock de sécurité moindre tout en assurant le même taux de service que la révision périodique. Ceci est dû au fait qu'une révision périodique revient à exiger une protection de sécurité sur une période nécessairement plus longue que pour une révision continue.

2.3.4 Les politiques de gestion des stocks

Une fois le gestionnaire a déterminé la classe de l'article (A, B, ou C) fait le choix du type de révision (continue versus périodique), il peut spécifier la politique de gestion de stock. Il s'agit alors de répondre aux questions « Quand passer une commande d'approvisionnement ? » et « Combien commander ? ». On trouve principalement quatre politiques de gestion synthétisées dans le tableau 2.1.

	Révision continue	Révision périodique
Article A	(s, S)	(R, s, S)
Article B	(s, Q)	(R, S)

Tableau 2.1. Les politiques de gestion de stocks (Silver et al. 98)

En ce qui concerne l'article de classe C, l'entreprise utilise généralement une approche manuelle simple qui peut être équivalente à (s, Q) ou (R, S).

Nous présentons, dans ce qui suit, les détails de ces politiques en nous basant sur la référence (Silver et al. 98).

2.3.41 La politique à point de commande, quantité à commander (s, Q)

C'est une politique à révision continue (i.e. $R=0$); le niveau du stock est constamment connu. Elle est notée aussi par (r, Q) où r désigne le « reorder point ». Cette politique consiste à commander une quantité fixe (Q) de produits lorsque la position de stock atteint un niveau minimum (s), appelé seuil critique ou point de commande. L'avantage de cette politique est sa simplicité dans l'implémentation lorsqu'il s'agit de gérer des produits à faible consommation ou peu coûteux. Son inconvénient principal est qu'elle n'est pas efficace lorsque la demande vient à varier de manière importante par rapport aux prévisions, en particulier si la demande qui déclenche un ordre d'approvisionnement est plus grande que la quantité de commande Q.

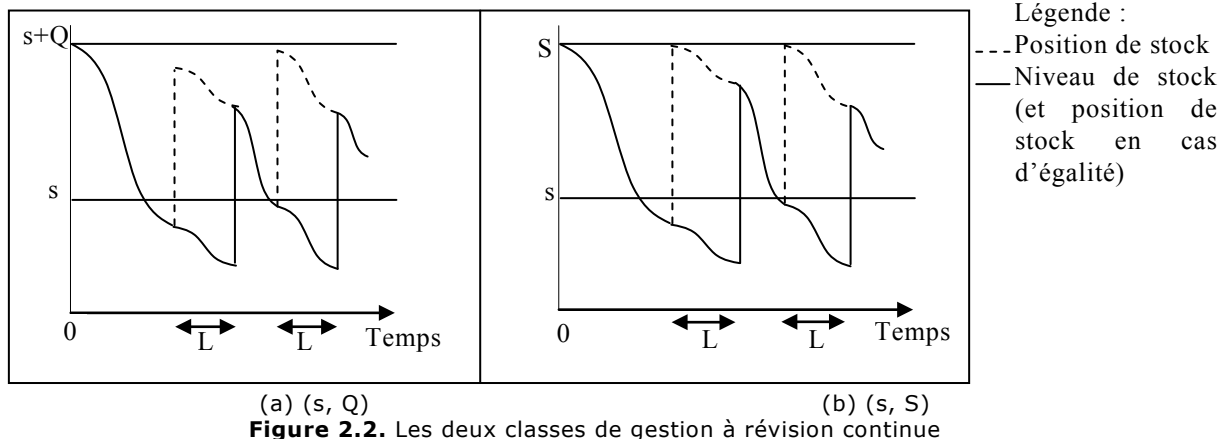
Dans le cas où la demande suit une distribution normale, certains travaux proposent des algorithmes itératifs afin de déterminer les valeurs s et Q sous contrainte du taux de service (Moon et Choi 94 ; Rosling 99 ; Zhang et al. 01 ; Geunes et al. 01 ; Axsäter 05). Ces travaux s'accordent sur l'utilisation de la quantité économique de commande (EOQ de Wilson (Wilson 34)) comme solution initiale.

2.3.42 La politique à point de commande, niveau de reemplètement (s, S)

Cette politique considère aussi une révision continue et, de manière analogue à la politique (s, Q), un ordre d'approvisionnement est passé lorsque la position de stock atteint le point de commande (s). Cependant, à l'opposé de la politique (s, Q), une quantité de commande variable est passée amenant la position de stock jusqu'au niveau de reemplètement S.

Si toutes les demandes sont unitaires, les deux politiques sont identiques parce que la réquisition d'un approvisionnement va être toujours faite quand la position de stock

est exactement égale à s ; c'est-à-dire $S=s+Q$. Si les demandes sont plus grandes qu'une unité, la quantité de commande dans la politique (s, S) devient variable. La figure 2.2 (a-b) illustre la différence entre les deux politiques. La politique (s, S) est fréquemment référée par la politique min-max parce que la position de stock est toujours comprise entre la valeur minimum s et la valeur maximum S .



Le coût total de commande, de possession et de rupture dans la politique (s, S) est généralement inférieur à celui de la politique (s, Q) . Cependant, le calcul pour déterminer la meilleure paire (s, S) est complexe. La littérature relative à cette politique est importante. Certains travaux se sont intéressés à discuter le problème de l'optimalité des paramètres de la politique sous diverses caractéristiques de demande et de délai (Richard 75; Feldman 78; Hordijk et al. 86; Gross et Harris 73; Federgruen et Zheng 85). D'autres travaux ont simplifié le problème en cherchant des heuristiques (Sivlazier 74 ; Kruse 81; Sahin 79 ; Zheng 92 ; Fu 94 ; Fu et Healy 97 ; Rosling 99).

2.3.43 La politique à révision périodique, niveau de rechargement (R, S)

Cette politique est connue aussi sous le nom de gestion calendaire, ou rechargement calendaire ou remise à niveau S . La procédure de contrôle consiste à commander une quantité variable de produit amenant la position de stock jusqu'à S à chaque R périodes. La figure 2.3 (a) illustre le comportement de cette politique. La gestion calendaire présente l'avantage d'être simple à mettre en oeuvre, de permettre un bon regroupement des commandes chez un même fournisseur et de se suffire d'un système d'information simple. Néanmoins, la politique (R, S) présente l'inconvénient d'imposer un stock de sécurité qui couvre tout le cycle d'approvisionnement en plus du délai d'approvisionnement, ce qui entraîne des coûts de possession élevés. Il est donc évident que cette politique est plus coûteuse que les systèmes continus (Naddor 62) pour un article pris isolément.

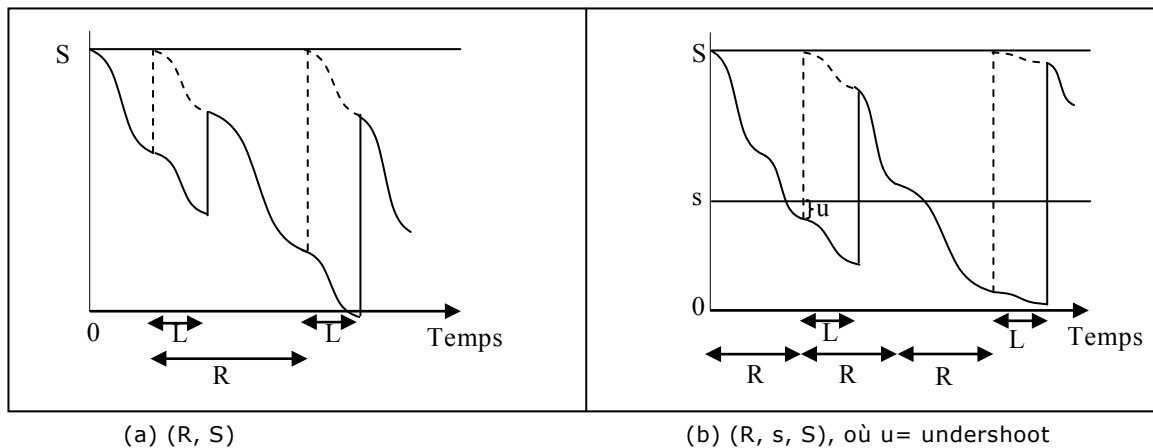


Figure 2.3. Les deux classes de gestion à révision périodique

2.3.44 La politique (R, s, S)

C'est une combinaison des politiques (s, S) et (R, S) . Cette politique consiste à contrôler la position de stock chaque R périodes et de passer une commande jusqu'au niveau maximum de stock S si la position de stock a atteint le point de commande s (cf. Figure 2.3 (b)). Sous des hypothèses générales concernant la modélisation de la demande et les facteurs coûts impliqués, une politique (R, s, S) bien dimensionnée produit un coût inférieur (coûts de commande, de possession et de rupture) en comparaison avec celui des autres politiques. Cependant, la complexité pour obtenir les meilleures valeurs des trois paramètres de contrôle est plus grande que celle des autres politiques. La politique (R, s, S) est très répandue lorsque la période de révision R optimale est importante.

L'étude de cette politique a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Plusieurs travaux ont traité du calcul des niveaux de stock optimum ou proche de l'optimum dans des modèles avec demandes différées et délais fixes. Nous pouvons citer ceux de (Zabel 62; Johnson 68; Portues 72; Freeland et Porteus 80; Schneider 78-79; Zheng et Federgruen 91; Iyer et Schrage 92; Sethi et Cheng 97; Viswanathan 97), etc. Cependant, rares sont les travaux qui ont étudié les demandes perdues (Morton 71 ; Nahmias 79 ; Archibald 81; Cohen et al. 88).

2.3.45 Autres politiques de gestion de stock

A part ces quatre politiques de base, nous rencontrons dans la littérature, mais de manière moins fréquente, les politiques de gestion de stocks suivantes :

- Une gestion (R, s, Q) à révision périodique : Cette politique consiste à contrôler la position de stock chaque R périodes et à commander une quantité fixe de produits lorsque le stock a atteint le point de commande (s). On trouve dans (Janssen et al. 98) une étude sur la détermination du point de commande s sous contrainte d'un taux de service. Kiesmüller et de Kok (Kiesmüller et de Kok 06) se sont intéressés à la détermination du point de commande minimal sous contrainte d'un temps d'attente maximum.
- Une gestion (R, s, nQ) à révision périodique : Cette politique consiste à contrôler la position de stock chaque R périodes et à commander un lot égal à n

fois la quantité fixe Q lorsque le stock a atteint le point de commande (s) (Larsen et Kiesmüller 06). La variabilité de n permet ainsi de résoudre les situations ponctuelles de fortes demandes.

- Une gestion (s, nQ) à révision continue : Cette politique consiste à commander en lot de n fois la quantité fixe Q dès que la position de stock atteint le point de commande (s). Dans une étude comparative, Richards (Richards 75) indique que les deux politiques (s, S) et (s, nQ) sont identiques lorsque toutes les demandes sont unitaires.
- Une gestion $(S-1, S)$ ou approvisionnement un-pour-un : Cette politique consiste à réapprovisionner une unité de produit à chaque demande d'une unité (Sherbrooke 68) et (Graves 85). Cette gestion est dédiée aux articles chers et faisant l'objet de demande unitaire.

2.4 Les difficultés de la politique de gestion (R, s, S)

2.4.1 La notion d'undershoot

Les systèmes à révision périodique sont plus compliqués à paramétrer que les systèmes à révision continue car, lors de la passation d'une commande, la position du stock est rarement égale au point de commande mais à une valeur au-dessous, égale à un moins une quantité (u) appelée « undershoot » (Baganha et al. 96a-b). La figure 2.3 (b) illustre cette notion. Les systèmes à révision périodique s'en accommodent de deux manières complémentaires :

- passer une commande jusqu'à S (quantité variable) plutôt qu'une quantité fixe ;
- ajuster le point de commande en tenant compte de la quantité de l'undershoot.

Dans nos travaux nous prenons en compte l'undershoot dans la quantité de commande. Plus précisément, les calculs du point de commande et du niveau de recomblerment sont basés sur la demande par période, la moyenne et la variance de la demande durant le délai d'approvisionnement et l'undershoot. Ainsi, le choix des bonnes valeurs pour s et S dépend des valeurs de la moyenne et de la variance de l'undershoot.

Quand la demande est unitaire, l'undershoot peut être négligé. Mais, lorsque la demande n'est pas unitaire, l'undershoot peut avoir un impact considérable sur les mesures de performance. Or, la prise en considération de l'undershoot dans la modélisation du problème conduit à des expressions très complexes pour le taux de service, s et S (Silver et al. 98). C'est pourquoi, peu d'auteurs le considèrent. Cohen et al. (Cohen et al. 88) ont établi une modélisation mathématique complexe d'un problème d'optimisation pour un système de stock mono site sous contrainte d'un taux de service β , avec demandes perdues. Nous détaillerons leur approche dans le chapitre 4.

2.4.2 Caractéristiques de la fonction coût

Pour la politique de gestion (R, s, S) , Scarf (Scarf 59) a dû introduire le concept de K -convexité pour traiter la fonction coût total dans laquelle un coût fixe K (coût de setup) vient s'ajouter au coût de commande à chaque nouvel ordre

d'approvisionnement. L'expression du coût de commande s'écrit dans ce cas sous la forme :

$$c(z) = K + cz \quad z > 0 \tag{1}$$

avec z =quantité de commande et c =coût unitaire de commande.

Plus précisément, la prise en considération d'un coût fixe supplémentaire à chaque commande complique considérablement la résolution du problème et, de là, rend la fonction coût total (commande, possession et rupture) non convexe. Il est supposé, dans (Aggarwal et Dhavale 75), d'atténuer cette complexité on ne retenant que le coût fixe pour la commande. L'expression de la fonction coût total pour chaque période devient :

$$f(y) = \begin{cases} K + \int_0^y ch(y-x) f(x) dx + \int_y^{+\infty} cp(x-y) f(x) dx & \text{si } y \leq s \\ \int_0^y ch(y-x) f(x) dx + \int_y^{+\infty} cp(x-y) f(x) dx & \text{sinon} \end{cases} \tag{2}$$

avec y =position de stock, x =demande par période, $f(x)$ =sa fonction densité de la demande, ch =coût de possession par unité et cp =coût de rupture par unité.

Ainsi, le premier terme de cette équation (2) diffère du deuxième uniquement par l'ajout du coût fixe de commande, du moment où il n'y a pas de passation d'un ordre d'approvisionnement dans la période que si $y \leq s$. La figure 2.4 illustre cette notion de K-convexité de la fonction coût total et montre que S minimise f . Cette allure de la fonction coût total conduit à avoir plusieurs minima locaux (Wagner et al. 65 ; Veinott et Wagner 65 ; Sahin 82 ; Aneja et Noori 87), ce qui implique que toutes les combinaisons possibles $\{(s, S), s < S\}$ doivent être évaluées afin de déterminer les paramètres optimaux de la politique (R, s, S) considérée. Un certain nombre de travaux se sont intéressés à délimiter cette évaluation en déterminant des bornes supérieure et inférieure pour chacun des paramètres s et S , sous diverses hypothèses (Rosling 99; Zheng et Federgruen 91; Federgruen et Zipkin 84).

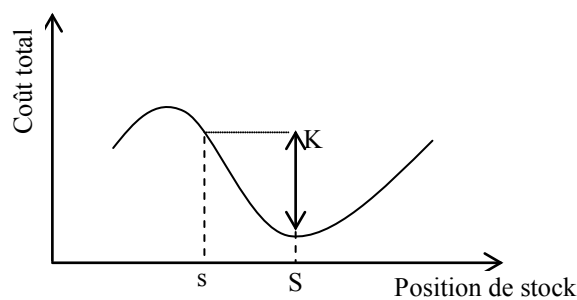


Figure 2.4. Allure K-convexe de la fonction coût total pour la politique (R, s, S) (Aneja et Noori 87)

2.5 Objectifs spécifiés : coût et service

2.5.1 Présentation

Les principaux objectifs sont de deux ordres :

- Minimiser le coût total, c'est-à-dire l'ensemble des coûts de commande, de possession et de rupture : Cette approche implique la spécification (explicite ou implicite) d'un coût de rupture. La recherche de la meilleure politique de gestion se réduit alors à la recherche des valeurs des paramètres de la politique de gestion qui permettent de minimiser ce coût.
- Assurer un taux de service minimum : Dans ce cas, l'objectif devient explicitement la garantie d'une disponibilité satisfaisante en produits. Il y a aussi un choix considérable dans la sélection d'une mesure de service. Nous rappelons, dans le paragraphe qui suit, les mesures des taux de service les plus communément utilisées.

2.5.2 Les taux de service

Les mesures du taux de service peuvent prendre différentes formes. Celles que nous présentons dans ce qui suit ont été définies dans le contexte d'un système à demandes différées.

2.5.21 Type I ou α

Ce taux mesure la probabilité que toutes les demandes arrivant dans un intervalle de temps donné soient complètement livrées à partir du stock disponible, c.-à-d. sans retard. Deux versions de taux de service α sont discutées. Elles se distinguent selon l'intervalle de temps au cours duquel la commande arrive :

- L'intervalle de temps est considéré comme étant une période standard : Dans ce cas, α_{per} exprime la probabilité que la demande périodique arrivant de manière arbitraire soit servie à partir du stock disponible.

$$\alpha_{per} = P\{\text{demande par période} \leq \text{stock disponible}\} \quad (3)$$

- L'intervalle de temps est considéré comme étant égal à la durée d'un cycle d'approvisionnement (multiple de périodes standards correspondant au délai d'approvisionnement) : Dans ce cas, α_{cyc} exprime la probabilité de non rupture dans un cycle d'approvisionnement (Dupont 98). Sur un horizon relativement long, cette probabilité correspond à la proportion des cycles d'approvisionnement sans rupture dans l'ensemble total des cycles.

$$\alpha_{cyc} = P\{\text{demande durant un délai} \leq \text{stock disponible au début du délai}\} \quad (4)$$

2.5.22 Type II ou β

Le taux de service β ou « taux de satisfaction » est la proportion des quantités ayant pu être satisfaites à partir du stock disponible ; autrement dit, le rapport entre le nombre de produits fournis et le total des quantités demandées (Dupont 98).

Dans les cas de demandes différées ou demandes perdues, on peut écrire :

$$\beta = 1 - \frac{\text{Total de demande différée (ou perdue)}}{\text{Demande totale}} \quad (5)$$

Schneider et Rinks, dans (Schneider et Rinks 91), précise que le taux de service α traduit indirectement la fréquence des occurrences de rupture et permet donc de déterminer le coût de rupture par occurrence alors que le taux de service β permet de calculer un coût de rupture par unité en rupture.

Tempelmeier, dans (Tempelmeier 00), précise de son côté que le taux de service α est une mesure de service orientée événement (occurrence de rupture) alors que le taux de service β est une mesure de performance orientée quantité (proportion d'une demande totale, livrée sans retard à partir du stock disponible).

Ces deux taux de service s'avèrent être fréquemment utilisés dans la pratique industrielle (Tempelmeier 00). On trouve plus rarement le troisième type suivant.

2.5.23 Type III ou γ

Le taux de service γ est une mesure qui lie le temps et la quantité et sert à refléter non seulement la quantité de demandes différées mais également les temps d'attente des demandes différées. Dans (Tempelmeier 00), le taux de service γ est défini comme suit :

$$\gamma = 1 - \frac{\text{moyenne de demande différée par période}}{\text{Demande moyenne par période}} \quad (6)$$

Il y a lieu de préciser que, dans le calcul de γ , une demande différée qui est restée en attente durant deux périodes avant l'arrivée d'un approvisionnement est comptée deux fois alors qu'elle n'est comptée qu'une seule fois dans le calcul de β . C'est dans ce sens que γ tient compte des temps d'attente.

2.6 Modélisation théorique du stock et calcul du stock de sécurité

2.6.1 Caractéristiques de la demande

L'hypothèse communément utilisée dans la littérature est que la demande par période suit une distribution normale de moyenne μ et d'écart type σ . La demande durant le délai d'approvisionnement (L) suit alors une distribution normale de moyenne μ_L et écart type σ_L (équation (7)). On a :

$$\begin{aligned} \mu_L &= L\mu \\ \sigma_L &= \sqrt{L}\sigma \end{aligned} \quad (7)$$

Il s'agit là de l'hypothèse retenue par la plupart des chercheurs dans l'analyse des politiques de gestion à révision continue ou périodique.

2.6.2 Heuristiques pour la politique (s, Q)

S'appuyant sur (Silver et al. 98), nous nous attachons dans les paragraphes suivants à présenter les heuristiques permettant de calculer le point de commande selon deux règles de décision, une pour un taux de service α et une pour un taux de service β . Dans ces heuristiques, on suppose que la valeur de la quantité de commande Q est déterminée de manière indépendante.

Rappelons tout d'abord quelques notations utiles :

$p_{u \geq}(\cdot)$ Probabilité d'avoir une rupture durant un cycle d'approvisionnement (i.e. demande supérieure au point de commande)

k Facteur de sécurité

$G_u(k)$ Fonction normale centrée réduite (i.e. $N(0,1)$) utilisée pour déterminer les ruptures par cycle d'approvisionnement et définie dans (Silver et al. 98) comme suit :

$$G_u(k) = \int_k^{\infty} (u - k) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] du \quad (8)$$

2.6.21 Règle de décision pour un taux de service α spécifié

On suppose que le gestionnaire a spécifié la probabilité α_{cyc} de ne pas avoir de rupture durant un cycle d'approvisionnement. On a alors la règle de décision suivante :

Étape 1 : Sélectionner, sur un tableur ExcelTM donnant $k = \text{Loi.Normale.Standard.Inverse}(\alpha_{cyc})$, le facteur de sécurité k qui satisfait l'équation $p_{\geq u}(k) = 1 - \alpha_{cyc}$

Étape 2 : Calculer le stock de sécurité : $ss = k\sigma_L$

Étape 3 : Déduire le point de commande $s = \mu_L + ss$, arrondi à l'entier supérieur.

2.6.22 Règle de décision pour un taux de service β spécifié

On suppose que le gestionnaire a spécifié le taux de service β . Dans ce cas, deux règles de décision sont distinguées selon qu'on a un modèle de demandes différées ou un modèle de demandes perdues.

2.6.221 Modèle de demandes différées

Dans un modèle de demandes différées, on a la règle de décision suivante :

Étape 1 : Sélectionner le facteur de sécurité k qui satisfait l'équation $G_u(k) = (1 - \beta)Q / \sigma_L$

Pour une distribution normale de la demande, la détermination de la valeur k à partir de cette équation est approchée par une fonction rationnelle avec des polynômes en numérateur et dénominateur de degrés différents :

$$z = \sqrt{\log(25/G_u(k)^2)}$$

$$k = \frac{a_0 + a_1z + a_2z^2 + a_3z^3}{b_0 + b_1z + b_2z^2 + b_3z^3 + b_4z^4} \quad (\text{cf. Tableaux 2.2 et 2.3})$$

Schneider et Ringuest (Schneider et Ringuest 90) et Silver et al. (Silver et al. 98) confirment que cette approximation est suffisamment précise pour les besoins pratiques et qu'elle est facile à implémenter dans le tableur Excel™. Les valeurs de $G_u(k)$ ont été calculées et présentées dans (Silver et al. 98), Table B.1 p. 725.

Étape 2 : Calculer le stock de sécurité : $ss = k\sigma_L$

Étape 3 : Déduire le point de commande $s = \mu_L + ss$, arrondi à l'entier supérieur.

a_0	a_1	a_2	a_3
-5.3925569	5.6211054	-3.883683	1.0897299

Tableau 2.2. Les valeurs des coefficients a_i (Silver et al. 98)

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
1	$-7.2496485 \cdot 10^{-1}$	$5.07326622 \cdot 10^{-1}$	$6.6913686 \cdot 10^{-2}$	$3.29129114 \cdot 10^{-3}$

Tableau 2.3. Les valeurs des coefficients b_i (Silver et al. 98)

2.6.222 Modèle de demandes perdues

Dans le modèle de demandes perdues, l'expression de $G_u(k)$ dans l'étape 1 devient (Silver et al. 98) :

$$G_u(k) = \frac{Q}{\sigma_L} \left(\frac{1 - \beta}{\beta} \right) \tag{9}$$

Les étapes 2 et 3 restent les mêmes.

Dans le cas où le taux de service est élevé, l'équation de $G_u(k)$ pour la demande perdue aboutit à la même valeur du point de commande que dans le cas de demande différée (Silver et al. 98).

2.6.3 Heuristique pour la politique (R, S)

La politique (R, S) à révision périodique peut être considérée comme une politique équivalente à celle de (s, Q) si l'on considère les correspondances données dans le tableau 2.4.

(s, Q)	(R, S)
s	S
Q	R μ
L	L+R

Tableau 2.4. Équivalence entre les politiques (s, Q) et (R, S), (Silver et al. 98)

Selon cette équivalence, la moyenne et l'écart type de la demande durant le cycle d'approvisionnement (délai d'approvisionnement+ période de révision) sont donnés par :

$$\begin{aligned}\mu_{L+R} &= (L + R) \mu \\ \sigma_{L+R} &= \sqrt{L + R} \sigma\end{aligned}\tag{10}$$

Dans cette heuristique, on suppose que la période de révision est prédéterminée. Ainsi, dans un modèle de demandes différées, on a la règle de décision suivante :

Étape 1 : Sélectionner le facteur de sécurité k qui satisfait l'équation $G_u(k) = (1 - \beta)Q / \sigma_{L+R}$

A l'instar de l'étape 2 donnée en §2.6.221, la détermination de la valeur de k à partir de cette équation est approchée par une fonction rationnelle :

$$\begin{aligned}z &= \sqrt{\log(25/G_u(k)^2)} \\ k &= \frac{a_0 + a_1z + a_2z^2 + a_3z^3}{b_0 + b_1z + b_2z^2 + b_3z^3 + b_4z^4}\end{aligned}$$

Les valeurs de a_i et b_i sont les mêmes qui sont données dans les tableaux 2.2 et 2.3

Étape 2 : Calculer le stock de sécurité : $ss = k\sigma_{L+R}$

Étape 3 : Déduire le niveau de recombplètement $S = \mu_{L+R} + ss$, arrondi à l'entier supérieur.

2.6.4 Heuristiques pour la politique (R, s, S)

2.6.41 Approximation des valeurs (s, S) basée sur un coût de rupture spécifié

Ehrhardt et Mosier, dans (Ehrhardt et Mosier 84), ont proposé une méthode heuristique sous le nom « revised power approximation », basée sur un coût de rupture connu afin de déterminer les valeurs des deux paramètres de gestion s et S. Dans leur heuristique, les auteurs ont considéré une période de révision unitaire (R=1). La règle de décision du « revised power approximation » est :

Étape 1 : Calculer la quantité de commande approchée Q_p et le point de commande approché s_p :

$$Q_p = 1.30 \mu^{0.494} (K/ch)^{0.506} (1 + \sigma_{L+1}^2 / \mu^2)^{0.116}$$

et

$$s_p = 0.973 \mu_{L+1} + \sigma_{L+1} \left(\frac{0.183}{z} + 1.063 - 2.192z \right)$$

$$\text{avec } z = \sqrt{\frac{Q_p ch}{\sigma_{L+1} cp}}$$

Étape 2 : Si $Q_p / \mu > 1.5$ alors

$$s = s_p$$

$$S = s_p + Q_p$$

Sinon Calculer

$$S_0 = \mu_{L+1} + k\sigma_{L+1}$$

$$s = \min \{s_p, S_0\}$$

$$S = \min \{s_p + Q_p, S_0\}$$

avec un facteur de sécurité k qui satisfait l'équation $p_{u \geq}(k) = \frac{ch}{ch + cp}$

Dû à son efficacité et à sa simplicité, cette heuristique a été adoptée par (Schneider et Ringuest 90 ; Silver et al. 98). Nous l'adopterons, à notre tour, pour simplifier la modélisation de notre problème (chapitres 4, 5 et 6).

2.6.42 Approximation des valeurs (s, S) basée sur un taux de service spécifié

Schneider et Ringuest (Schneider et Ringuest 90) ont proposé une approximation pour calculer les valeurs (s, S) dans l'objectif de minimiser le coût total (les coûts de commande et de possession) sous contrainte du taux de service γ ; i.e. les demandes différées par période ne doivent pas dépasser la fraction $(1 - \gamma)$ de la demande moyenne par période, cette demande étant exprimée par une loi normale.

2.7 Structure multi échelons

2.7.1 Les problèmes liés aux systèmes de stock multi échelons

2.7.1.1 Caractéristiques générales

Dans une structure multi échelons, le produit est stocké dans plusieurs sites et l'approvisionnement est effectué généralement à partir de sites d'échelon juste supérieur. Une structure à trois échelons est illustrée par la figure 2.5. Dans cet exemple, les détaillants (1^{er} échelon) sont approvisionnés à partir du centre de distribution (2^{ème} échelon) qui est lui-même approvisionné par un entrepôt central (3^{ème} échelon) ; ce dernier est approvisionné par un fournisseur externe. La gestion de stock dans ce système est complexe parce que la demande à l'entrepôt central dépend de la demande du centre de distribution et de ses décisions de stockage. De même, la demande du centre de distribution dépend de la demande des détaillants et de leurs décisions de stockage). Il s'agit donc, à chaque niveau, d'une situation de demande dépendante du niveau inférieur. Or, la situation la plus fréquente dans la littérature est de considérer la demande comme indépendante. On comprend dès lors que les techniques courantes de stock multi échelons se soient inspirées de celles d'une structure un échelon. Comme l'indiquent quelques travaux de recherche (Clark et Scarf 60 ; Veinott 66 ; Ferdergouen et Zipkin 84b), le problème se décompose en N sous-problèmes résolus par la programmation dynamique s'il n'y a pas des contraintes liant les N détaillants (i.e., s'il n'y a pas de pooling ou autre type de coordination entre détaillants).

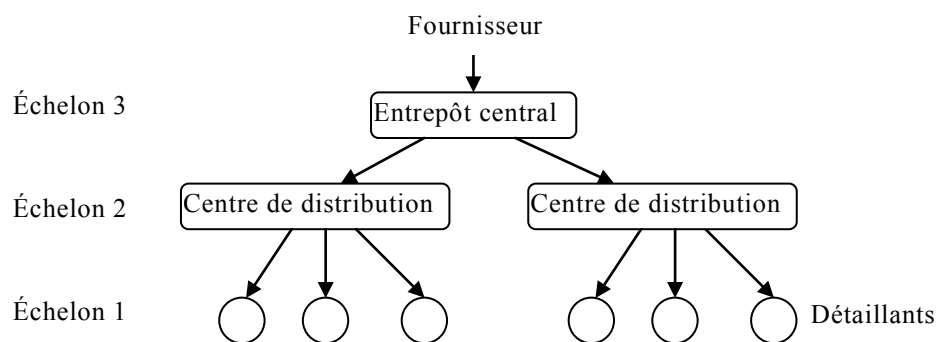


Figure 2.5. Chaîne logistique à trois échelons (Silver et al. 98)

La modélisation des systèmes de stock multi échelons avec demandes indépendantes est actuellement un domaine de recherche très actif. Les chercheurs se sont focalisés sur cette hypothèse d'indépendance que ce soit dans le cas déterministe ou dans le cas stochastique. Les modélisations sont souvent très complexes et demandent la formulation d'un grand nombre d'hypothèses relatives à la distribution de la demande, aux délais d'approvisionnement et aux politiques de gestion de stock. De manière générale, on suppose que les détaillants ont à faire face à une demande qui suit soit une loi de Poisson ou une loi normale et que l'ensemble des coûts est linéaire. Il semble que les premières méthodes de résolution ont été obtenues pour des politiques de type un-pour-un (S-1, S). Le travail fondamental dans cette classe a été proposé par Sherbrooke (Sherbrooke 68) qui a construit un modèle mathématique METRIC

(Multi Echelon Technique for Recoverable Item Control) pour l'analyse de cette politique dans le cas d'articles réparables. Par la suite, d'autres politiques ont pu être étudiées, qu'elles soient continues à point de commande (s, Q) (Zheng 92), périodiques (R, S) (Nahmias et Smith 94).

De plus, on trouve les travaux de Clark et Scarf (Clark et Scarf 60) représentent une avancée importante dans les systèmes de stock (R, s, S) multi échelons. Ils ont déterminé une solution optimale pour un modèle de stock à deux échelons et une solution approchée pour un modèle de stock multi échelons sous les conditions suivantes :

- Le coût d'achat et de transport d'un produit à partir d'un site de stockage vers le site suivant est linéaire et ne suppose par un coût fixe de setup K ; ce dernier coût est introduit seulement à l'échelon supérieur.
- Les coûts de possession et de rupture à un niveau donné sont supposés être des fonctions du stock à ce niveau et de tous les stocks des niveaux avals ou en transit entre ceux-ci. Il s'agit de la notion de stock échelon (détaillée dans la section suivante).
- A chaque échelon, les demandes en excès sont considérées comme étant des demandes différées.
- Chaque site a un seul fournisseur (structure arborescente).

Schneider et Rinks (Schneider et Rinks 91) ont traité un système de stock (R, s, S) avec demandes différées, composé d'un centre de distribution et de N détaillants. L'objectif était d'élaborer une politique de coordination de stock pour le centre de distribution et les détaillants et ce, sous contrainte du taux de service. Dans leur modèle, les auteurs ont spécifié les coûts de rupture chez les détaillants et le taux de service α chez le centre de distribution. Ils ont montré qu'il existe un taux de service optimal au centre de distribution qui minimise le coût total du système. Ils ont déterminé également que le coût total est assez sensible au taux de service du centre de distribution. De plus, les paramètres de la demande chez les détaillants, les coûts de rupture chez les détaillants et le délai d'approvisionnement du centre de distribution ont un effet sur la valeur optimale du taux de service α du centre de distribution.

Ce que l'on peut retenir de ces modèles est que tous les détaillants doivent adopter une même politique de gestion, c'est-à-dire qu'ils doivent tous suivre une politique périodique ou à point de commande.

2.7.12 Stock échelon versus stock installation

Un système de gestion de stocks multi échelons peut être conçu de différentes manières. La gestion est effectuée soit au niveau du stock existant dans chaque installation, soit au niveau du stock échelon. Dans la stratégie de gestion de stock par installation, les décisions de commande, à chaque installation (ou site), sont basées sur la position de stock dans cette installation, c-à-d sur le stock disponible plus le stock en commande moins les demandes différées. La stratégie de stock échelon, quant à elle, signifie que les décisions de commande d'une installation i sont basées sur la position de stock échelon qui est égale à la somme de la position de stock à l'installation i et des stocks en transit ou disponibles dans toutes les installations

alimentées par i . Le concept de stock échelon a été introduit par (Clark et Scarf 60). Des extensions du travail de Clark et Scarf ont été réalisées dans (Axsäter et Rosling 93; Axsäter 97; Axsäter et Juntti 97) sous forme d'une étude comparative de stock échelon et de stock installation pour la politique de gestion (s, Q).

2.7.2 Types d'un système arborescent

Nous examinons, dans cette section, deux systèmes arborescents (cf. Figure 2.6) (Silver et al. 98). Le premier dans lequel le centre de distribution ne conserve pas de stock et le second dans lequel le centre de distribution détient un stock.

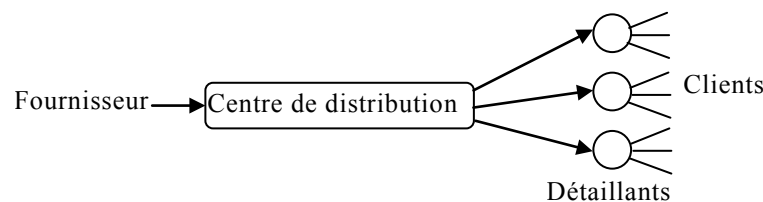


Figure 2.6. Structure arborescente (Silver et al. 98)

2.7.2.1 Système arborescent sans conservation de stock dans le centre de distribution

Quand le centre de distribution ne conserve pas de stock, il se comporte comme un site « break-bulk » en commandant les biens par lots et, à la réception, en partitionnant ces quantités et les expédiant immédiatement aux détaillants. Dans ce cas, chaque détaillant reçoit la quantité demandée entière (Eppen et Schrage 81). Il s'agit d'un système à flux poussé qui suppose la disponibilité de l'information globale ainsi qu'une décision centralisée.

La première étude que nous avons réalisée dans le cadre de nos travaux de thèse concerne ce type de système avec un centre de distribution qui ne conserve pas de stock (voir chapitres 4 et 5).

2.7.2.2 Système arborescent avec conservation de stock chez le centre de distribution

Lorsque le centre de distribution est un centre de stockage, l'analyse devient beaucoup plus compliquée. Il y a également deux types de décisions : la quantité que le centre de distribution doit commander à son fournisseur, la quantité à expédier à chaque période à chaque détaillant. Dans ce type de système, le problème majeur qui se pose est celui d'allocation et de rationnement. Quelques auteurs se sont penchés à trouver des règles pour aborder ces problèmes (Axsäter et al. 04 ; Diks et De Kok 96-99).

Nous nous sommes également intéressés, dans nos travaux de thèse, à ce second type de système (voir chapitre 6).

2.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes politiques de gestion de stock et les notions de base de ces politiques dans les structures un(multi) échelon(s). De cette synthèse, nous avons ressorti les difficultés rencontrées dans la détermination du point de commande ou du niveau de reapprovisionnement. Plusieurs heuristiques ont émergé en se basant sur un coût de rupture connu ou sur une contrainte du taux de service et sous l'hypothèse que la demande suit la distribution normale.

Concernant la politique (R, s, S) dans un système mono site de stockage et à demandes différées, les chercheurs ont développé des heuristiques pour déterminer s et S selon que la fonction de coût total est K -convexe. Ces heuristiques nécessitent de déterminer les bornes inférieures et supérieures de s et S pour cerner les valeurs optimales de la politique. Lorsque les demandes sont perdues, la difficulté de déterminer s et S est plus importante du fait que la distribution de la position de stock devient complexe à formuler. Le développement des heuristiques pour déterminer s et S se poursuit dans un système multi sites de stockage et multi échelons. Cet état de l'art sur les différentes heuristiques de résolution de la politique (R, s, S) nous a inspiré dans le choix des solutions que nous avons adoptées dans la résolution des cas de configurations considérées dans nos travaux. En particulier, nous avons retenu la démarche de (Cohen et al. 88) que nous avons utilisée dans la partie modélisation analytique de notre problème de transshipment.

Le troisième et dernier chapitre de cette première partie consacrée à l'état de l'art traite le problème de gestion de stock avec transshipment tout en mettant l'accent sur les difficultés induites.

Chapitre 3 : Les problèmes de transshipment

-
- 3.1 Préliminaire et définitions
 - 3.2 Les politiques de transshipment
 - 3.3 Classification des travaux de recherche
 - 3.3.1 Types de problèmes
 - 3.3.2 Méthodes de résolution et difficultés rencontrées
 - 3.3.3 Les principaux environnements étudiés pour l'application du transshipment
 - 3.4 Les modèles de transshipment d'urgence
 - 3.4.1 Les modèles de transshipment avec la politique (R, S)
 - 3.4.2 Les modèles de transshipment avec la politique (s, Q)
 - 3.4.3 Les modèles de transshipment avec la politique (S-1, S)
 - 3.4.4 Les modèles de transshipment avec les politiques (s, S) et (R, s, S)
 - 3.5 Les modèles de transshipment préventif
 - 3.6 Autres applications du transshipment
 - 3.7 Conclusion
-

3.1 Préliminaire et définitions

La gestion de stock multi sites avec transshipment est actuellement un domaine très actif de recherche. Le rôle principal du transshipment est de mutualiser les stocks pour pallier les incertitudes relatives aux demandes arrivant à des sites d'un même échelon et, ainsi, d'obtenir des effets analogues à ceux d'une consolidation des stocks. Cependant, en comparaison avec l'approche de consolidation, l'approche du transshipment permet une présence continue et une pénétration des marchés locaux avec une réponse rapide à la demande client. Le transshipment peut être vu aussi comme une flexibilité supplémentaire de service (Xu 97). A noter que, pour un même taux de service, le transshipment est généralement sensiblement moins coûteux qu'une commande d'urgence auprès d'un fournisseur si les sites latéraux sont situés à proximité. Néanmoins, il convient toujours de situer les bénéfices du transshipment par rapport aux coûts qu'ils entraînent, selon le contexte.

On relève principalement deux approches du transshipment. La première approche est celle du transshipment d'urgence ; elle correspond au transshipment effectué suite à une rupture de stock chez un détaillant résultant de l'arrivée d'une demande. Les travaux de (Herer et Rashit 99; Robinson 90; Tagaras 99; Tagaras et Cohen 92) ont analysé une telle approche. La deuxième approche est celle des transshipments préventifs ; ceux-ci correspondent à une redistribution d'équilibrage des stocks au début ou à la fin de chaque cycle d'approvisionnement mais avant que la demande des clients ne soit observée. Les travaux de (Diks et de Kok 96; Allen 61-62; Jonsson et Silver 87) ont traité de cette approche. Le transshipment d'urgence résout une situation effective de rupture. Le transshipment préventif, quant à lui, vise à prévenir de futures ruptures.

Les travaux ayant étudié le transshipment d'urgence sont les plus fréquents dans la littérature. Nous résumons, dans le paragraphe qui suit, les politiques adoptées dans ce contexte.

3.2 Les politiques de transshipment

- La politique *tout ou rien* : un détaillant soit satisfait entièrement la demande client manquante, soit ne livre rien (Evers 01 ; Needham et Evers 98).
- le *Complete pooling* : le détaillant accepte de transférer tout son stock disponible en cas de besoin ; autrement dit, il accepte de mettre en commun tout son stock, sans restriction (Tagaras et Cohen 92 ; Tagaras 99).
- le *Partial pooling* : le transshipment est effectué en préservant un niveau de stock ciblé. On trouve les variantes suivantes (Evers 01) :
 - le détaillant accepte le transshipment à concurrence du stock en surplus à son point de commande ;
 - le détaillant accepte le transshipment à concurrence du stock en surplus à son stock de sécurité ;
 - le détaillant accepte le transshipment à concurrence du stock en surplus à la demande estimée pour la période suivante.
 - la décision de faire un transshipment au niveau d'un détaillant dépend du niveau de stock courant et du temps restant avant l'approvisionnement suivant (Archibald et al. 09).

Tagaras et Cohen (Tagaras et Cohen 92) ont proposé un autre critère pour le partial pooling, basé sur le niveau de stock (stock net ou position de stock). L'idée est qu'un transshipment X_{ij} d'un détaillant i vers un détaillant j peut être effectué pour renfler le niveau de stock chez le détaillant j jusqu'à une hauteur t_j sans la dépasser et à condition de garder un niveau de stock r_i chez le détaillant i . Ainsi, le cas $t_j=0$ correspond ici à un transshipment d'urgence qui sert juste à rattraper une situation de rupture alors que le cas $t_j>0$ correspond à une situation intermédiaire entre le transshipment d'urgence et le transshipment préventif. L'hypothèse raisonnable est de supposer que l'on a $t_j \leq r_i \leq S_i$.

3.3 Classification des travaux de recherche

Les politiques de gestion de stock avec transshipment sont multiples. Nous proposons de grouper les travaux de recherche selon le type de problème qu'ils traitent et la manière dont le problème est modélisé.

Déjà, une manière de structurer la comparaison de ces travaux est de les situer par rapport aux dimensions suivantes (cf. Tableau 3.1) :

- Mono échelon/multi échelons ;
- Mono période/multi périodes/horizon de temps infini ;
- Article réparable/non réparable ;
- Type de politique de stock utilisée à chaque site de stockage : $(s, Q)/(s, S)/(R, S)/(R, s, S)$;
- Type de politique de transshipment : tout ou rien/complète pooling/partial pooling ;
- Demandes différées/perdues ;
- La demande est : déterministe constante/déterministe dynamique/stochastique loi connue/stochastique loi inconnue ;
- Le délai d'approvisionnement est : nul/constant/aléatoire ;
- La rupture est : modélisée par un coût de rupture constant par article/modélisée par un coût complexe/exprimée au travers d'un taux de service ;
- Le coût de commande est : nul/constant par commande/complexe (composé d'un coût fixe de setup et d'un coût variable) ;
- Le coût du transshipment est : linéaire (en fonction du nombre d'unités transférées)/fixe par transshipment/constant par requête de transshipment/complexe (composé d'un coût fixe et d'un coût variable) ;
- Le temps de transshipment est : nul/constant ;
- La méthode de résolution est : analytique/heuristique/par simulation.

Paterson et al. (Paterson et al.11) et Chiou (Chiou 08) ont proposé, chacun, une classification fine des travaux de recherche selon les dimensions susmentionnées en ajoutant deux dimensions que sont le nombre d'articles (un seul article ou multi articles) et le type de décision (centralisée ou décentralisée). Ces classifications aident à situer clairement les travaux entre eux et à mettre en exergue les gaps qui les séparent. Le principal objectif est de bien guider les chercheurs vers des futures orientations afin de rapprocher la résolution théorique des cas industriels réels. Nous nous sommes fortement inspirés pour la synthèse comparative présentée à la fin de ce chapitre, sauf que nous nous sommes restreints au contexte d'un produit unique qui est celui de nos travaux.

3.3.1 Types de problèmes

Structure de stockage : On distingue principalement la structure de stockage à un échelon, dans laquelle le fournisseur approvisionne directement plusieurs détaillants et les structures de stockage à deux échelons, dans lesquelles le fournisseur livre un centre de distribution qui distribue les produits aux détaillants. Les structures à plus de deux échelons ne semblent pas faire l'objet de recherches importantes en gestion de stocks. Dans la structure à un échelon, le fournisseur est supposé à capacité infinie et seulement les détaillants utilisent des politiques de stock. Dans la structure à deux échelons, le centre de distribution adopte lui aussi une politique de gestion de stock qui peut être identique ou différente de celle des détaillants.

Nature du produit : La nature des produits a une influence sur le choix de la politique de stock chez les détaillants et le centre de distribution et sur la modélisation de la demande client. On fait la distinction, en particulier, entre les produits réparables et les produits non réparables. Le cas des produits réparables est considéré principalement dans le contexte du stockage multi sites de "pièces" de rechange réparables, quand le type de pièces est exceptionnellement coûteux et, d'un MTBF (Moyenne des temps de bon fonctionnement) plutôt grand, mais dont la tombée en panne peut avoir des conséquences très critiques. Pour couvrir les besoins d'une région donnée, des centres de stockage sont prévus en divers points. Ces centres assurent, selon une stratégie propre à chacun, le stockage des pièces de rechange et conviennent de se soutenir mutuellement, par le biais du transshipment, pour couvrir le besoin immédiat en cas de rupture de stock.

Initialement, ce sont les organisations militaires qui ont adopté ce type d'approche. Elles ont été ensuite suivies par des grandes compagnies commerciales, notamment celles travaillant dans la navigation aérienne et le transport de façon générale.

Les particularités, comparativement au cas des produits non réparables, sont nombreuses :

- D'abord, l'enjeu le plus important est de réduire au maximum la durée de l'arrêt (ou du fonctionnement dégradé) en cas de panne. La pièce endommagée est systématiquement engagée en réparation et le centre qui répond à la requête de transshipment accepte tacitement d'être compensé par la dite pièce endommagée une fois réparée.
- La durée de la réparation varie selon la pièce et la panne et selon, également, la possibilité ou non de la réparer sur place.
- L'estimation des "pertes" en fonction de la durée des arrêts peut s'avérer complexe.
- La solidarité des centres engagés dans le réseau de transshipment est un facteur déterminant dans l'évaluation des chances de réussite d'une telle approche. Le cas classique que l'on rencontre est celui des centres qui sont liés par une même organisation (cas, par exemples, des bases militaires ou des magasins de pièces de rechange relevant d'une compagnie d'aviation).

3.3.2 Méthodes de résolution et difficultés rencontrées

On trouve, dans la littérature, des travaux qui proposent une solution optimale du problème sous des hypothèses restrictives des paramètres d'entrée susmentionnés.

D'autres travaux présentent une recherche heuristique ou une modélisation analytique approximative avec relaxation de certaines hypothèses. On trouve aussi des travaux qui cherchent des solutions satisfaisantes par la simulation pour des problèmes d'une grande taille et sous des hypothèses plus générales. La complexité dépend essentiellement des paramètres suivants :

- Taille du réseau ;
- Distribution de la demande ;
- Demandes différées ou perdues.
- Distribution du délai d'approvisionnement ;
- Temps de transshipment nul ou non nul ;
- Coûts de gestion identiques ou différents.

Ainsi, les modèles analytiques sont développés, dans leur majorité, sous des hypothèses particulières (deux sites de stockage, approvisionnement instantané et coûts identiques). En fait, la relaxation de l'hypothèse d'approvisionnement instantané complique considérablement l'analyse mathématique en raison des interactions entre la demande, les quantités de transshipment et les stocks en transit, qui entraînent une explosion de l'espace d'états (Tagaras 99). En outre, Tagaras a prouvé que le modèle exact devient insolvable même dans le cas de deux sites de stockage. Minner et al. (Minner et al. 03) ont également indiqué deux autres raisons : (i) les transshipments ont un effet secondaire sur la date de passation de commande ainsi que sur la taille de la quantité de commande au niveau du détaillant réalisant le transshipment et (ii) la construction des stocks de sécurité doit tenir compte des possibilités de transshipment. C'est pourquoi, beaucoup d'auteurs ont recouru à la simulation afin d'étudier un système de stock multi détaillants sous des hypothèses relaxées. C'est dans cette direction que s'oriente notre présent travail.

3.3.3 Les principaux environnements étudiés pour l'application du transshipment

En considérant les hypothèses liées à la taille du réseau, nous pouvons citer les travaux qui ont étudié le transshipment pour le cas de deux détaillants (Tagaras et Cohen 92 ; Robinson 90 ; Herer et Tzur 01) et ceux qui se sont intéressés au cas de détaillants multiples avec paramètres de coûts identiques et demandes stochastiques (Robinson 90). Herer et Tzur (Herer et Tzur 03) ont considéré des détaillants multiples non identiques dans un cadre de demande déterministe dynamique et Tagaras (Tagaras 99) a considéré un système semblable avec des demandes stochastiques.

Aussi certains travaux se sont focalisés sur l'évaluation du transshipment sur un horizon d'une seule période (Herer et Rashit 99), un horizon fini (Robinson 90) et (Herer et Tzur 03) ou un horizon infini (Tagaras et Cohen 92) et (Hu et al. 05).

Cependant, la majorité des recherches est orientée vers les approches de simulation. Tagaras (Tagaras 99) et Needham et Evers (Needham et Evers 98) ont analysé les effets du transshipment ainsi que des valeurs des paramètres de la demande et des délais d'approvisionnement sur la performance du système. Satyendra et Venkata (Satyendra et Venkata 05) ont étudié l'apport du transshipment sous l'hypothèse de partage d'information entre sites. Kurkreja et Schmidt (Kurkreja et Schmidt 05) ont

établi une procédure de recherche basée sur la simulation afin de résoudre le problème d'optimisation (minimiser le coût total sous contrainte d'un taux de service). Les travaux de (Banerjee et al. 03 ; Burton et Banerjee 05 ; Lee et al. 07) ont évalué, par le biais des coûts, les apports du transshipment dans un contexte d'approvisionnement centralisé et zéro stock de sécurité.

Par ailleurs, une hypothèse communément retenue est celle qui considère le temps de transshipment comme nul. Dans le même souci de simplification, quelques travaux considèrent qu'un seul transshipment est possible par cycle d'approvisionnement (Herer et Tzur 03 ; Axsäter 03b ; Xu 97). Minner et al., dans (Minner et al. 03- 05), considèrent un ensemble d'hypothèses très précises, dont des délais d'approvisionnement identiques tout en admettant la possibilité d'une extension au cas d'un délai spécifique à chaque site. Dans (Archibald et al. 97) et (Robinson 90), les délais d'approvisionnement sont considérés nuls. Les travaux rapportés dans (Tagaras 99) sont parmi les rares à avoir intégrés les hypothèses de délais différents et de demandes différentes. On trouve aussi des travaux qui considèrent les parties des demandes non satisfaites dans l'immédiat comme définitivement perdues alors que d'autres les traitent comme des demandes différées.

En outre, dans la littérature, l'accent est souvent mis sur les bénéfices du transshipment pour un système de stock de type (R, S) ou (s, Q). L'évaluation du transshipment pour les autres types de systèmes est peu abordée, notamment pour le cas du système de stock (s, S) qui est de nature complexe. Nous présentons dans ce qui suit les modèles issus de ces politiques.

3.4 Les modèles de transshipment d'urgence

3.4.1 Les modèles de transshipment avec la politique (R, S)

La plupart des travaux supposent une politique de rechargement calendaire avec une période de révision R multiple de périodes élémentaires. A la fin de chaque période élémentaire, le stock est évalué, les transshipments d'urgence possibles sont alors effectués simultanément et une commande d'approvisionnement est passée s'il s'agit d'une période de révision. Ces travaux adoptent généralement l'hypothèse des demandes différées. Rappelons que la politique (R, S) est particulièrement appropriée sous l'hypothèse de coûts de commande/setup négligeables.

Krishnan et Rao (Krishnan et Rao, 1965) ont développé un modèle de newsboy (R, S) pour un système à un échelon et N sites. Les auteurs se sont intéressés à déterminer les niveaux de rechargement optimaux qui minimisent les coûts de stockage et de transport sur une seule période, sous l'hypothèse de coûts identiques. Ils ont remarqué que les modèles de transshipment dans un système multi sites et multi périodes relèvent toujours d'une classe de la programmation dynamique et constituent une extension au problème de newsboy relatif à un seul site.

La complexité des calculs de résolution des politiques optimales d'approvisionnement et de transshipment incite toujours à utiliser des approximations et des méthodes heuristiques. Les études représentatives de cette catégorie sont celles de Karmarkar (Karmarkar 87) et de Robinson (Robinson 90). Karmarkar a développé des bornes

supérieure et inférieure du stock initial, pour les problèmes de stock stochastique multi sites et multi périodes, qui sont utilisées pour déterminer des solutions approximatives. Robinson a étendu l'analyse de Krishnan et Rao et de Karmarkar à un modèle multi périodes avec coûts différents entre détaillants. La solution optimale peut être trouvée analytiquement dans deux cas particuliers : coûts identiques entre les sites ou nombre de sites limité à deux. Ces deux cas particuliers sont utilisés pour valider la technique heuristique dans le cas général en utilisant l'intégration de Monte Carlo. Dans (Tagaras et Cohen 92), un modèle est proposé pour le cas d'un système de stock composé de deux détaillants identiques en délais et paramètres de la demande mais différents en coûts, visant à minimiser les coûts liés aux stocks pour les différentes stratégies du complete pooling et du partial pooling. Les auteurs ont montré, pour ce cas, l'efficacité de la stratégie du complete pooling. Tagaras (Tagaras 99) a étendu ce résultat au cas de trois détaillants identiques en coûts mais différents en délais et paramètres de la demande et a évalué, sous ces hypothèses, l'amélioration induite par le transshipment avec complete pooling sur les performances du système. Herer et al. (Herer et al. 02) ont montré le bénéfice du complete pooling dans un système à deux sites. De plus, ils ont étudié le cas de multi sites identiques/différents en écart type, à l'instar de ce qui est donné dans (Tagaras 99). Ils ont conclu qu'il est préférable d'organiser des groupes de pooling ayant les mêmes caractéristiques en paramètres de demande.

Herer et al. (Herer et al. 04) ont considéré un modèle de N sites non identiques en coûts, sans contraintes de capacité de transport pour réaliser un transshipment. Les demandes arrivant aux N sites sont supposées corrélées (or, l'hypothèse communément utilisée est que les demandes sont indépendantes, identiquement distribuées (i.e. i.i.d)). Ces auteurs ont établi une approche numérique permettant de déterminer les valeurs optimales des niveaux de stock S. Özdemir et al. (Özdemir et al. 06) ont étendu les travaux de (Herer et al. 04) en considérant des contraintes de capacité de transport selon laquelle les quantités de transshipment entre sites sont limitées en raison des moyens de transport. Ces auteurs ont développé une approche approximative stochastique efficace utilisant la simulation de Monte Carlo. Les résultats numériques montrent que les contraintes de capacité de transport augmentent le coût total de même qu'elles modifient la distribution des stocks dans tout le réseau. Le même problème étudié par Özdemir et al. a été aussi traité par Ekren et Heragu (Ekren et Heragu 08) en utilisant la méthode basée simulation-optimisation. La procédure de l'optimisation est réalisée par l'OptQuest du logiciel ARENA®.

Les travaux de (Banerjee et al. 03) et (Burton et Banerjee 05) se sont intéressés à l'évaluation, par le biais des coûts et pour des configurations à 2, 4 et 8 détaillants, des apports du transshipment basé sur la disponibilité (complete pooling) et ceux du transshipment préventif. Lee et al. (Lee et al. 07) ont démontré, comparativement aux résultats de (Banerjee et al. 03), l'efficacité d'une nouvelle approche "service level ajustement" qui réduit le risque en prévoyant la rupture à l'avance et répond à une rupture effective toute en couplant le transshipment préventif et le transshipment d'urgence ; à la fin de chaque période, les quantités de transshipment en préventif et en urgence sont déterminées selon des seuils de service prédéterminés.

3.4.2 Les modèles de transshipment avec la politique (s, Q)

Dans les travaux ayant adopté la politique à révision continue, c'est le système (s, Q) qui est le plus communément utilisé car relativement simple. Des investigations ont été menées sous les deux hypothèses des systèmes à demandes perdues et des systèmes à demandes différées. Sur la base d'une analyse des différents coûts, Needham et Evers (Needham et Evers 98) ont conclu que le principal paramètre qui détermine l'opportunité du transshipment latéral dans les systèmes multi sites à demandes perdues est le coût de rupture. Pour le cas d'un système à deux détaillants, Evers (Evers 01) a développé deux heuristiques pour déterminer les conditions où les transshipments seront avantageux. La première heuristique résout le problème du transshipment d'une seule unité et la deuxième s'adresse au transshipment d'unités multiples. La politique de transshipment tout ou rien est adoptée dans le modèle de Evers avec un coût de transshipment linéaire, dépendant uniquement de la quantité transférée. Minner et al. (Minner et al. 03) ont relaxé ces hypothèses en acceptant des transshipments par des quantités inférieures à celles demandées et en ajoutant un coût fixe par requête satisfaite. Ils ont aussi complété le modèle par la prise en compte des coûts d'approvisionnement ainsi que des coûts de rupture éventuels consécutifs à la décision du transshipment. Plus tard dans (Minner et al. 05), Minner et al. ont proposé un mécanisme de choix entre deux politiques (pas de transshipment ou transshipment systématique) pour un ensemble de caractéristiques du problème de transshipment avec deux détaillants identiques. L'étude effectuée dans (Xu 97, Xu et al. 03) a poursuivi celle donnée dans (Evers 01) pour le cas des systèmes à demandes différées. Les auteurs ont ajouté à la politique classique (s, Q) un troisième paramètre, un niveau critique (H), qui contrôle le niveau des transshipments sortants (c-à-d le niveau de stock au-delà duquel le transshipment est permis).

L'étude effectuée par Axsäter, dans (Axsäter 03a), diffère de celles mentionnées ci-dessus par le fait qu'elle considère des transshipments unidirectionnels. Cette politique est utilisée lorsque les détaillants ont des coûts de rupture différents. Ainsi, le transshipment s'effectue depuis le détaillant ayant un coût de rupture faible vers un autre détaillant ayant un coût de rupture élevé. Axsäter a proposé une technique de résolution pour le cas de la politique (s, Q) ainsi que pour le cas de la politique (R, S), sous l'hypothèse des demandes différées. Dans la même optique du travail de Axsäter, Olssen (Olssen 09-10) s'est intéressé à résoudre le problème de transshipment unidirectionnel dans des systèmes de stock de type (s, Q) ou (S-1, S) à demandes différées ou perdues.

3.4.3 Les modèles de transshipment avec la politique (S-1, S)

Nous pouvons citer, ici, les travaux de (Lee 87), (Axsäter 90) et (Dada 92) qui ont traité du problème de transshipment latéral d'urgence pour les articles réparables des pièces de rechange. Les modèles utilisés se caractérisent par un échelon supérieur (dépôt) qui sert pour l'approvisionnement et un échelon inférieur (les bases) où il y a du stock disponible et où sont reçues les commandes. Chaque base est gérée avec la politique (S-1, S). Aussi ces modèles sont des extensions du modèle METRIC (Sherbrooke 68) et sont, de ce fait, de type approché. Toutefois, ces modèles se distinguent selon les hypothèses traitant les bases et le pooling. Les modèles dans (Lee 87) et (Dada 92) considèrent des bases identiques alors que dans (Axsäter 90) les bases sont supposées non identiques. Les travaux de (Lee 87) et (Axsäter 90) font

l'hypothèse que les bases sont réparties en groupes à l'intérieur desquels le transshipment peut être effectué alors que (Dada, 1992) traite toutes les bases de l'échelon inférieur comme si elles constituent un seul groupe. Les approches de (Lee 87), (Axsäter 90) et (Dada 92) ont connu un grand succès parce qu'elles supposent que la demande suit une loi de Poisson et la politique d'approvisionnement est de type (S-1, S). Si une autre politique est utilisée, le nombre d'états peut devenir très grand, ce qui rend la résolution mathématique très difficile.

L'étude de (Wong et al. 05) est parmi les rares à avoir considéré un temps de transshipment non nul et un transshipment latéral différé ; i.e. en cas de rupture chez un site, si aucun site ne possède de stock disponible alors le transshipment est différé (mis en attente) jusqu'à ce que le stock devient positif dans un des sites.

3.4.4 Les modèles de transshipment avec les politiques (s, S) et (R, s, S)

L'étude du transshipment pour les systèmes de stock (s, S) ou (R, s, S) a suscité relativement moins de travaux, sans doute à cause de sa nature plus complexe. Sous l'hypothèse de coût d'approvisionnement fixe, Herer et Rashit (Herer et Rashit 99) ont résolu un modèle d'une seule période pour deux sites avec des coûts non identiques. Les auteurs ont prouvé que la politique optimale de gestion dans ce système de transshipment n'est pas de la forme (s, S).

Hu et al. (Hu et al. 05) ont examiné la politique (R, s, S) dans un système de stock composé d'un centre de distribution et de N détaillants avec une gestion centralisée au niveau du centre de distribution. Les hypothèses considérées dans leur modèle sont très restrictives : délais d'approvisionnement et de transshipment nuls, paramètres de demande identiques, coûts identiques et horizon de temps infini. Dans ce cadre, les auteurs ont proposé une approche fondée sur la programmation dynamique afin de trouver la politique optimale approximative (s, S) du système entier au niveau du centre de distribution.

Néanmoins, le travail le plus proche du notre est celui de (Kurkreja et Schmidt 05). Nous proposons de mettre en relief les similitudes et différences entre nos deux modèles.

Ces deux travaux présentent les similitudes suivantes :

- un système de stock multi détaillants,
- la recherche de la meilleure solution (s, S), pour chaque détaillant, minimisant le coût total et garantissant un taux de service donné,
- une approche de résolution sous forme d'un problème d'optimisation utilisant une procédure de recherche basée sur la simulation.
- la distribution porte sur un seul type de produit,
- la stratégie de transshipment est de type complete pooling,
- les transshipments sont instantanés,
- les passations de commandes durant le cycle d'approvisionnement ne sont soumises à aucune contrainte,
- l'horizon de temps est fini.

Cependant, les modèles considérés diffèrent considérablement en plusieurs caractéristiques récapitulées dans le tableau ci-dessous :

	Kurkreja et Schmidt	Présent travail
# Echelon	Un	Deux/Multi
Type de produit	Réparable	Non réparable
Politique de gestion	(s, S) continue	(R, s, S) périodique
Loi de la demande	Loi de Poisson compose	Loi normale
Demande/période	Faible	moyenne
Ruptures	Demandes différées	Demandes perdues
Délais	Distribution de Weibull	Constants

Tableau 3.2. Les différences d'hypothèses entre le modèle étudié dans (Kurkreja et Schmidt 05) et celui considéré dans le présent travail

Dans la contribution objet du présent travail, nous visons une optimisation plus poussée pour la détermination des deux paramètres s et S en se basant sur un couplage entre la simulation et l'optimisation.

3.5 Les modèles de transshipment préventif

Dans la littérature, quelques modèles traitent des systèmes de stock à deux échelons et à multi sites où les transshipments sont utilisés comme une mesure préventive pour équilibrer les niveaux de stock chez les détaillants utilisant la politique (R, S). Allen (Allen 61-62) a étudié un système de stock à détaillants multiples identiques en coûts et à délai d'approvisionnement nul en visant à minimiser les coûts de rupture et de la redistribution. Das (Das 75) a adopté les mêmes hypothèses de Allen mais en se limitant à un système de stock à deux sites et en permettant les transshipments au milieu de chaque cycle d'approvisionnement. Selon la même structure du système de Allen mais en considérant un délai positif d'approvisionnement, Jonsson et Silver (Jonsson et Silver 87) ont examiné un système d'approvisionnement centralisé en mettant l'accent sur la redistribution complète des stocks durant la dernière période d'un cycle d'approvisionnement afin d'équilibrer les niveaux de stock chez tous les détaillants. Ils ont montré qu'une réduction considérable en stock de sécurité est possible en utilisant cette redistribution, de même qu'une amélioration du service est obtenue. Bertrand et Bookbinder (Bertrand et Bookbinder 98) ont étendu le problème à un système multi détaillants non identiques en coûts. L'hypothèse d'un centre de distribution qui gère un système de stock à décision centralisée selon la politique (R, S) est maintenue. Dans le cas de détaillants identiques, les auteurs ont confirmé les résultats obtenus par Jonsson et Silver. Dans le cas de détaillants non identiques, la simulation montre que des valeurs élevées de la longueur du cycle d'approvisionnement, du nombre de détaillants et des coûts de possession, couplées avec de faibles valeurs des coûts de transshipment et du délai fournisseur favorisent la politique de redistribution. Les modèles de Jonsson et Silver et de Bertrand et Bookbinder ont été implémentés pour les deux cas de temps de transshipment nul et non nul. Les auteurs ont montré que l'introduction d'un temps de transshipment non nul complique la modélisation au niveau du stock en transit (ou en commande).

Diks et al. (Diks et al. 96) ont étudié le transshipment préventif en supposant que le centre de distribution ainsi que les détaillants utilisent la politique (R, S). Ils ont

considéré un modèle où le centre de distribution alloue le stock aux différents détaillants selon une politique de rationnement « *consistent appropriate share* » et ils ont fixé comme objectif de maintenir un taux de service ciblé pour chacun des détaillants.

3.6 Autres applications du transshipment

Herer et Tzur (Herer et Tzur 01) sont les premiers auteurs qui ont examiné les transshipments dans un environnement de demande déterministe dynamique sur un horizon fini de périodes. Le système étudié est composé de deux sites s'approvisionnant auprès d'un seul fournisseur. Il est modélisé en intégrant des coûts d'approvisionnement fixes et variables, des coûts de transshipment fixes et variables ainsi que des coûts de possession différents ; l'objectif étant de déterminer combien réapprovisionner et combien transférer à chaque période pour une satisfaction à temps de toutes les demandes. Les auteurs ont prouvé l'efficacité d'un algorithme polynomial développé pour résoudre un tel problème. Ils ont étendu ce travail dans (Herer et Tzur 03) en développant une heuristique pour un système de stock multi sites.

Dans le même environnement de demande, Sripathomswat, dans (Sripathomswat 08), s'est intéressé à étudier un problème inspiré d'un cas réel (Electricité de France) dont il a réduit la taille (nombre de fournisseurs, d'entrepôts et de produits). Le système de distribution considéré est composé d'un réseau de fournisseurs externes et des entrepôts centraux. L'objectif visé est de déterminer, sous l'hypothèse de produits multiples, le réseau de distribution qui minimise le coût total du système (coûts de commande, de possession et de transshipment) et satisfait à temps toutes les demandes clients. Il s'agit alors de déterminer la manière de coordonner les entrepôts centraux. Ce problème a été décomposé en des sous-problèmes permettant de répondre aux questions suivantes :

- où garder le stock des produits finis ?
- quelle est la politique de transshipment à utiliser ?
- quelle est la politique de gestion de stock à utiliser ?

Ces sous-problèmes sont résolus par des programmes linéaires mixtes et par des techniques de programmation dynamique, sous des hypothèses spécifiques telles que : capacité infinie du fournisseur, délais d'approvisionnement et de transshipment nuls, demande connue sur tout l'horizon, capacité illimitée des entrepôts, coûts de possession identiques par produit et les différents coûts se composent d'une partie fixe et d'une partie variable. L'étude menée par Sripathomswat consiste à cerner les situations où la stratégie proposée, basée sur la coordination, est avantageuse. Pour ce faire, l'auteur s'est orienté vers le test de l'impact d'un ensemble de paramètres d'entrée tels que : demande régulière/irrégulière, volume de la demande (faible/élevée), coûts de commande et de transshipment (faibles/élevés).

Le tableau 3.1 présente la classification des travaux de recherche ayant traité le problème de transshipment, en fonction des dimensions exposées dans la section 3.3.

Auteurs	# Echelon	# sites	Article Réparable/Non réparable	Coûts	Délais d'approvisionnement	Politique de gestion	Transshipment	Distribution de la demande	Demande Perdue/ Différée	Méthodologie de résolution
Allen (61, 62)	Un	Multi	Non réparable	Identiques	Zéro	(R, S)	Préventif	Normale (Identiques)	Différée	Analytique
Krishnan et Rao (65)	Un	Multi	Non réparable	Identiques	Zéro	(R, S)	Urgence	Normale (Identiques)	Différée	Analytique
Das (75)	Un	Deux	Non réparable	Différents	Non Zéro-Identiques	(R, S)	Au milieu de chaque cycle	Aléatoire (Différentes)	Différée	Programmation convexe
Jonsson et Silver (87)	Deux	Multi	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques	(R, S)	Préventif	Normale (Identiques)	Différée	Analytique
Lee (87)	Multi	Multi	Réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques	(S-1, S)	Urgence	Poisson (Identiques)	Différée	Modèle approximatif
Karmarkar (87)	Un	Multi	Non réparable	Identiques	Zéro	(R, S)	Urgence	Aléatoire (Identiques)	Différée	Approximation analytique
Robinson (90)	Un	Multi	Non réparable	Identiques/ Différents	Zéro	(R, S)	Urgence	Aléatoire (Identiques)	Différée	Analytique/ Heuristique utilisant Monte Carlo
Axsäter (90)	Deux	Multi	Réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques	(S-1, S)	Urgence	Poisson (Identiques/ Différentes)	Différée	Modèle approximatif
Dada (92)	Multi	Multi	Réparable	Identiques	Loi exponentielle	(S-1, S)	Urgence	Poisson (Identiques)	Perdue	Procédure approximative
Tagaras et Cohen (1992)	Un	Deux	Non réparable	Identiques/ Différents	Non Zéro-Identiques/ Différents	(R, S)	Urgence	Normale (Identiques/ Différentes)	Différée	Simulation
Diks et al. (96)	Deux	Multi	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques	(R, S)	Préventif	Normale (Identiques/ Différentes)	Différée	Analytique/ Simulation
Archibald et al. (97)	Un	Deux	Non réparable	Identiques	Zéro	(R, S)	Urgence	Poisson (Identiques)	Perdue	Modèle Markovien/ Programmation dynamique

Tableau 3.2. Classification des travaux de recherche (suite 1)

Auteurs	# Echelon	# sites	Article Réparable/Non réparable	Coûts	Délais d'approvisionnement	Politique de gestion	Transshipment	Distribution de la demande	Demande Perdue/Différée	Méthodologie de résolution
Xu et al. (97, 03)	Un	Multi	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques	(s, Q)	Urgence	Poisson (Identiques)	Différée	Approximation Analytique/ Simulation
Bertrand et Bookbinder (98)	Deux	Multi	Non réparable	Différents	Non Zéro-Identiques	(R, S)	Préventif	Normale (Identiques/ Différentes)	Différée	Analytique /Simulation
Needham et Evers (98)	Multi	Multi	Non réparable	Identiques	Loi Gamma	(s, Q)	Urgence	Normale réduite (Identiques)	Perdue	Simulation/ méta-modèle utilisant Least square regression
Tagaras (99)	Un	Multi	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques/ Différents	(R, S)	Urgence	Normale (Identiques/ Différentes)	Différée	Simulation
Herer et Rashit (99)	Un	Deux	Non réparable	Différents	Zéro	(R, S)	Urgence	Uniforme (Identiques)	Perdue	Analytique
Evers (01)	Un	Deux	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques/ Différents	(s, Q)	Urgence	Normale (Identiques)	Perdue	Heuristique/ Simulation
Herer et Tzur (01)	Un	Deux	Non réparable	Différents	Zéro	(R, S)	Urgence	Déterministe (Différentes)	Non	Heuristique
Herer et al. (02)	Un	Multi	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques/Différents	(R, S)	Urgence	Normale (Identiques)	Différée	Simulation-Optimisation
Axsäter (03a)	Un	Multi	Non réparable	Différents	Non Zéro-Identiques	(s, Q) et (R, S)	Urgence (unidirectionnel)	Normale (Identiques)	Différée	Analytique/ Simulation
Axsäter (03b)	Un	Multi	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques	(s, Q)	Urgence	Poisson composé (Identiques)	Différée	Heuristique/ Simulation

Tableau 3.2. Classification des travaux de recherche (suite 2)

Auteurs	# Echelon	# sites	Article Réparable/Non réparable	Coûts	Délais d'approvisionnement	Politique de gestion	Transshipment	Distribution de la demande	Demande Perdue/Différée	Méthodologie de résolution
Herer et Tzur (03)	Un	Multi	Non réparable	Identiques	Zéro	(R, S)	Urgence	Déterministe (Différentes)	Non	Analytique/Heuristique
Minner et al. (03)	Un	Deux	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques	(s, Q)	Urgence	Poisson composé (Identiques)	Perdue	Analytique/Simulation
Banerjee et al. (03)	Deux	Multi	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques	(R, S)	Urgence et Préventif	Uniforme (Identiques)	Différée	Simulation
Herer et al. (04)	Un	Multi	Non réparable	Identiques/Différents	Zéro	(R, S)	Urgence	Normale/Uniforme (Identiques)	Différée	Simulation
Özdemir et al. (06)	Deux	Multi	Non réparable	Identiques/Différents	Zéro	(R, S)	Urgence	Uniforme (Identiques)	Différée	Heuristique/Simulation
Burton et Banerjee (05)	Deux	Multi	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques	(R, S)	Urgence et Préventif	Uniforme (Identiques)	Différée	Simulation
Hu et al. (05)	Un	Multi	Non réparable	Identiques	Zéro	(R, s, S)	Urgence	Normale (Identiques)	Différée	Programmation dynamique
Kurkreja et Schmidt (05)	Un	Multi	Réparable	Identiques	Loi Weibull	(s, S)	Urgence et Préventif	Poisson (Identiques)	Différée	Simulation
Minner et al. (05)	Un	Deux	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques	(s, Q)	Urgence	Normale/Poisson (Identiques)	Perdue	Heuristique/Simulation
Satyendra et Venkata (05)	Un	Deux	Non réparable	Identiques	Zéro/Non Zéro-Identiques	(s, Q)	Urgence	Normale (Identiques)	Perdue	Simulation

Tableau 3.2. Classification des travaux de recherche (suite 3)

Auteurs	# Echelon	# sites	Article Réparable/Non réparable	Coûts	Délais d'approvisionnement	Politique de gestion	Transshipment	Distribution de la demande	Demande Perdue/Différée	Méthodologie de résolution
Wong et al. (05)	Un	Multi	Réparable	Identiques	Loi Exponentielle	(S-1, S)	Urgence/Avec délai	Poisson (Identiques)	Différée	Modèle Markovien
Lee et al. (07)	Deux	Multi	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques	(R, S)	Urgence et Préventif	Normale (Différentes)	Différée	Heuristique/Simulation
Ekren et Heragu (08)	Deux	Multi	Non réparable	Différents	Zéro	(R, S)	Urgence	Uniforme (Identiques)	Différée	Simulation-Optimisation
Sripathomswat (08)	Multi	Multi	Non réparable	Différents	Zéro	(R, S)	Urgence	Déterministe (Différentes)	Non	Modèle PL mixte/Programmation dynamique
Archibald et al. (09)	Un	Multi	Non réparable	Différents	Zéro	(R, S)	Urgence	Poisson (Identiques)	Différée	Modèle Markovien
Olssen (09-10)	Un	Deux	Non réparable	Différents	Non Zéro-Identiques	(S-1, S) (s, Q)	Urgence (unidirectionnel)	Poisson (Identiques/Différentes)	Différée/Perdue	Heuristique/Simulation
Tlili et al. (10)		Multi	Non réparable	Identiques	Non Zéro-Identiques/Différentes	(R, s, S)	Urgence	Normale (Identiques/Différentes)	Perdue	Simulation-Optimisation

Tableau 3.2. Classification des travaux de recherche (suite 4)

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques générales relatives aux systèmes de stock avec transshipment. Nous avons passé en revue divers travaux réalisés en les classifiant par type de transshipment et par politique de gestion de stock. Dans la littérature, les différentes approches de transshipment se distinguent sommairement en deux familles : le transshipment d'urgence et le transshipment préventif. Les politiques (R, S) , (s, Q) , (s, S) , (R, s, S) et $(S-1, S)$ ont été utilisées dans ces travaux ; les interactions de type transshipment entre les sites du réseau de distribution s'avèrent compliquer considérablement la résolution du problème de gestion des stocks. De façon générale, la mise en œuvre d'une politique de transshipment dans le réseau conduit à une réduction des coûts, à une amélioration du taux de service et à un abaissement des niveaux de stock.

Ce chapitre clôt, ainsi, la première partie consacrée à la synthèse de l'état de l'art. Sur la base de cette synthèse, le positionnement de notre problématique de recherche, ses similarités et ses spécificités apparaissent de façon claire : Nous nous intéressons à l'étude de systèmes de stock du type (R, s, S) à deux/multi échelons et deux/multi détaillants. Nous nous plaçons dans les hypothèses où les différents coûts sont connus et où la demande client suit une distribution normale. Comme politiques de transshipment, nous expérimentons la stratégie tout ou rien, le partial pooling et des variantes du complete pooling. L'objectif visé est de

- déterminer, pour chaque détaillant et/ou centre de distribution, les paramètres de gestion s et S minimisant le coût total qui inclut les coûts de commande, de possession, de rupture et de transshipment,
- identifier les différents facteurs qui influent sur les performances d'un système de stock avec transshipment et analyser le comportement de celui-ci sous diverses contraintes,
- cerner, de façon générale, les conditions sous lesquelles l'instrumentation du transshipment est bénéfique.

La présentation de nos contributions à ce sujet fait l'objet de la deuxième partie qui suit.

Partie 2

Modélisation et résolution

Dans cette partie, nous proposons d'étudier le problème de transshipment dans trois structures différentes de réseau de distribution. En premier temps, nous développons un modèle mathématique et un modèle de simulation-optimisation d'un système de stock à deux échelons et deux détaillants, avec coût de transshipment linéaire. En deuxième temps, nous nous intéressons à traiter un système de stock à deux échelons et détaillants multiples, avec coût de transshipment fixe dans lequel nous examinons la sensibilité des politiques de transshipment aux différents paramètres d'entrée. Finalement, nous complexifions la structure en étudiant un système de stock multi échelons et à deux détaillants, avec coût de transshipment fixe.

Chapitre 4 : Système à deux échelons et deux détaillants, avec coût de transshipment linéaire

-
- 4.1 Modélisation mathématique
 - 4.1.1 Description générale du problème
 - 4.1.2 Notations et hypothèses adoptées
 - 4.1.3 Modèle simplifié de (Cohen et al. 88) d'un système sans transshipment
 - 4.1.4 Passage du modèle simplifié de (Cohen et al. 88) à un modèle à deux détaillants avec transshipment
 - 4.1.5 Limite de la solution obtenue
 - 4.2 Approche par simulation-optimisation
 - 4.2.1 Analogie des notations utilisées entre le modèle mathématique et le modèle de simulation
 - 4.2.2 Les politiques de transshipment utilisées
 - 4.2.3 Modèle de stock (R, s, S) à demandes perdues intégrant le transshipment
 - 4.2.4 Le problème d'optimisation
 - 4.2.5 Résolution par simulation-optimisation
 - 4.3 Expérimentation
 - 4.3.1 Description du cas d'étude
 - 4.3.2 Résultats généraux
 - 4.3.3 Système symétrique vs. système asymétrique en délais d'approvisionnement
 - 4.4 Conclusion
-

4.1 Modélisation mathématique

Dans ce chapitre, nous considérons un système de distribution à deux échelons, composé d'un centre de distribution et de deux détaillants. Nous supposons que le centre de distribution est à même de livrer les commandes en respectant un délai fixe lié au détaillant et ce, quelles qu'en soient les quantités.

4.1.1 Description générale du problème

La politique étudiée est celle d'un système de stock (R, s_i, S_i) pour chaque détaillant i . Selon cette politique, à la fin de chaque période de révision R (supposée égale à une période élémentaire), si la position de stock ($z_i = \text{stock disponible} + \text{quantité en commande}$) se trouve égale ou inférieure à s_i alors une commande est passée vers le centre de distribution pour ramener la position du stock jusqu'au niveau de recombplètement S_i . La quantité de commande est alors exprimée comme suit :

$$Q_i = \begin{cases} S_i - z_i & \text{si } z_i \leq s_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (11)$$

Les commandes du détaillant i sont livrées par le centre de distribution après un délai d'approvisionnement de L_i périodes. Autrement dit, une commande d'approvisionnement passée à la fin de la période t est livrée au début de la période $t+L_i+1$. Un cycle d'approvisionnement est le temps qui s'écoule entre deux arrivées consécutives de livraisons. À chaque ordre d'approvisionnement est associé un coût de commande fixe K . Les détaillants traitent les demandes clients pour un seul type de produit. La demande x_i chez le détaillant i durant une période élémentaire est une variable aléatoire qui suit la distribution normale de moyenne μ_i et d'écart type σ_i . Nous faisons l'hypothèse que les demandes chez les détaillants sont indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d). La demande durant un cycle d'approvisionnement est aussi une variable aléatoire que l'on note par xc_i . Quand la demande xc_i provoque une rupture (xc_i supérieure au stock disponible y_i chez le détaillant i) et qu'un transshipment est effectué depuis le détaillant j , la quantité de transshipment X_{ji} est fonction de la partie de la demande non satisfaite et du stock disponible y_j chez le détaillant j . Nous supposons également que le temps de transshipment est nul et que le coût de transshipment ct est un coût unitaire. Enfin, nous permettons la satisfaction partielle de la demande par le détaillant, avec la quantité obtenue par le stock disponible et le transshipment. Les demandes ou fractions de demandes qui ne peuvent être satisfaites par le stock disponible et le transshipment sont perdues et font l'objet d'un coût de rupture cp par unité perdue. Dans tous les cas, le stock disponible devient égal à zéro et le restera jusqu'au prochain approvisionnement. En outre, à la fin de la période de révision, le stock restant entraîne un coût de possession ch par unité et par période.

La modélisation mathématique que nous développons dans le paragraphe qui suit concerne un système de transshipment composé de deux détaillants identiques en demandes, délais (L_i est remplacé par L) et coûts. La démarche que nous avons choisie est inspirée des travaux de (Cohen et al. 88) et (Xu 97). Rappelons que Cohen et al. ont résolu un système de stock (R, s, S) à demandes perdues mais en

considérant un seul site de stockage et Xu a traité le problème de transshipment multi détaillants dans un système de stock (s, Q) à demandes différées. Notre objectif est de commencer par cerner les difficultés rencontrées dans la résolution d'un petit système de distribution utilisant le transshipment afin de dégager des pistes de résolution pour les grands systèmes de distribution.

4.1.2 Notations et hypothèses adoptées

Les notations suivantes sont utilisées pour l'expression du modèle :

x_i	Demande durant une période élémentaire chez le détaillant i (variable stochastique)
xL_i	Demande durant le délai d'approvisionnement chez le détaillant i (variable stochastique)
xc_i	Demande durant un cycle d'approvisionnement chez le détaillant i (variable stochastique)
$f_i(xc_i)$	Fonction densité de probabilité (p.d.f) de xc_i
$F_i(xc_i)$	Fonction de distribution cumulative (c.d.f) de xc_i
y_j	Niveau du stock chez le détaillant j au début du cycle d'approvisionnement
$\phi_j(y_j)$	Fonction densité de probabilité (p.d.f) correspondant à y_j
$\Phi_j(y_j)$	Fonction de distribution cumulative (c.d.f) correspondant à y_j
z_j	Position du stock chez le détaillant j au début du cycle d'approvisionnement
$u_j(z_j)$	Fonction densité de probabilité (p.d.f) correspondant à z_j
SD	Taux de service désiré

Système de stock indépendant (i.e. sans transshipment, qui revient à l'étude d'un seul détaillant i)

$R(s_i)$	Espérance mathématique de la quantité de rupture chez le détaillant durant un cycle d'approvisionnement
$\Psi^b(s_i, S_i)$	Taux de service durant un cycle d'approvisionnement du détaillant
$C_i^b(s_i, S_i)$	Coût total chez le détaillant

Système de stock avec transshipment

X_{ji}	Quantité de transshipment depuis le détaillant j vers le détaillant i durant un cycle d'approvisionnement, $j \neq i$
$E(X_{ji})$	Espérance mathématique de la quantité de transshipment depuis le détaillant j vers le détaillant i durant un cycle d'approvisionnement, $j \neq i$
$P(s_i)$	Espérance mathématique de la demande perdue par le détaillant i durant un cycle d'approvisionnement
$\Psi^a(s_i, S_i)$	Taux de service durant un cycle d'approvisionnement du détaillant i
$C_i^a(s_i, S_i)$	Coût total chez le détaillant i

En outre, nous considérons les hypothèses suivantes :

(H₁) Toute demande ou partie de demande non satisfaite est perdue ;

- (H₂) La demande client est indépendante dans le temps et entre détaillants. Cependant, les demandes sont identiquement distribuées pour les deux détaillants ;
- (H₃) La demande chez un détaillant i suit toujours la loi normale (distribution continue) ;
- (H₄) Une seule passation de commande est admise par cycle d'approvisionnement (ce qui implique $S-s>s$) ;
- (H₅) Les coûts de possession, de rupture et de transshipment sont linéaires ;
- (H₆) Le coût de commande est fixe (K) ;
- (H₇) Le temps de transshipment est nul ;
- (H₈) Un seul transshipment est autorisé par cycle d'approvisionnement ;
- (H₉) La satisfaction partielle d'une demande est permise ;
- (H₁₀) Le délai d'approvisionnement (L) entre le centre de distribution et les détaillants est constant et identique pour tous les détaillants ;
- (H₁₁) La demande x_{c_i} chez le détaillant i et le stock disponible y_j chez le détaillant j sont indépendants. En d'autres termes, leur distribution commune en probabilité est égale au produit de leur distribution marginale ; $h_{ji}(y_j, x_{c_i}) = \varphi_j(y_j) f_i(x_{c_i})$. Cette hypothèse est importante dans les calculs des intégrales intervenant dans la modélisation ci-dessous.

Dans les sections suivantes, nous décrivons d'abord la modélisation d'un système de stock sans transshipment. Puis nous donnons le modèle avec transshipment.

4.1.3 Modèle simplifié de (Cohen et al. 88) d'un système sans transshipment

Cohen et al. ont développé, dans (Cohen et al. 88), une méthode de résolution pour le cas d'un détaillant unique et un système de stock de type (R, s, S) avec demandes perdues. Ils ont intégré l'undershoot dans la formulation du point de commande. Rappelons que lors de la passation d'une commande, la position du stock est rarement égale au point de commande mais à une valeur au-dessous ; la quantité (u) qui sépare le seuil s et la position de stock est appelée undershoot. L'objectif de Cohen et al. est de calculer le coût total (commande, possession et rupture) ainsi que le taux de service durant un cycle d'approvisionnement puis de déduire le coût total par période.

En nous inspirant de cette démarche, nous avons tenté de reprendre le même modèle pour le cas de deux détaillants et de le compléter par la prise en compte de la coopération par transshipment. Cependant, nous avons abouti à un modèle mathématique très complexe. Pour revenir à une complexité acceptable, nous nous sommes résolus à simplifier le modèle de Cohen et al. en considérant l'undershoot comme étant toujours une quantité négligeable et assimilable à zéro, ce qui revient à considérer que lors de la passation de commande, la position de stock coïncide avec le seuil s . Le modèle simplifié devient le suivant :

Quantité de rupture :

Le détaillant i tombe en rupture de stock si la demande durant le cycle d'approvisionnement est supérieure au point de commande. Ainsi, l'espérance mathématique de la quantité de rupture durant un cycle d'approvisionnement est donnée par :

$$R(s_i) = E[(xc_i - s_i)^+] = \int_0^{\infty} (xc_i - s_i)^+ f_i(xc_i) dxc_i \quad (12)$$

avec $(x)^+ = \max(0, x)$

Stock moyen :

Avant l'arrivée d'une livraison, le stock disponible est égal à $E[(s_i - xc_i)^+]$ et la quantité en commande est de $s_i - s_i$. Le stock après l'arrivée d'une livraison est alors égal à $s_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+]$. Ainsi, le stock moyen est :

$$\left(s_i - s_i + 2 E[(s_i - xc_i)^+] \right) / 2 \quad (13)$$

Demande moyenne par cycle :

La demande moyenne par cycle d'approvisionnement est égale à la somme de la quantité commandée, du stock résiduel et de la demande perdue :

$$s_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i) \quad (14)$$

Longueur moyenne d'un cycle d'approvisionnement :

Étant donnée μ_i la demande moyenne par période chez le détaillant i , la longueur moyenne d'un cycle d'approvisionnement est :

$$\frac{s_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i)}{\mu_i} \quad (15)$$

Coût total :

D'après (Cohen et al. 88), le coût total (commande, possession et rupture) par cycle d'approvisionnement du détaillant i est :

$$C_i^b(s_i, S_i) = K + cp R(s_i) + \frac{ch}{2} (s_i - s_i + 2 E[(s_i - xc_i)^+]) * \left(\frac{s_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i)}{\mu_i} \right) \quad (16)$$

Le coût total par période chez le détaillant i prend alors la forme suivante :

$$\overline{C}_i^b(s_i, S_i) = \mu_i \frac{K + cp R(s_i)}{s_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i)} + \frac{ch}{2} (s_i - s_i + 2 E[(s_i - xc_i)^+]) \quad (17)$$

Taux de service :

Si on rapproche la proportion de demande non satisfaite par période élémentaire de la proportion de demande non satisfaite durant un cycle d'approvisionnement, le taux de service est ainsi exprimé par (Cohen et al. 88) :

$$\Psi^b(s_i, S_i) = 1 - \frac{R(s_i)}{S_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i)} = \frac{S_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+]}{S_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i)} \quad (18)$$

On pose $Q_i = S_i - s_i$. Le coût total par période et le taux de service se reformulent comme suit :

$$\overline{C}_i^b(s_i, Q_i) = \mu_i \frac{K + cp R(s_i)}{Q_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i)} + \frac{ch}{2} (Q_i + 2E[(s_i - xc_i)^+]) \quad (19)$$

et

$$\Psi^b(s_i, S_i) = \frac{Q_i + E[(s_i - xc_i)^+]}{Q_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i)} \quad (20)$$

Le problème d'optimisation est alors :

$$\text{Min } \overline{C}_i^b(s_i, Q_i)$$

Sous contrainte de :

$$\Psi^b(s_i, Q_i) \geq SD$$

$Q_i \geq 0, s_i \geq 0$: entiers

Cohen et al. ont déterminé la quantité de commande optimale à l'aide de la dérivée partielle du premier ordre du coût total par rapport à Q_i sans tenir compte de la contrainte de taux de service :

$$Q_i^*(s_i) = \sqrt{\frac{\mu_i(K + cp R(s_i))}{ch/2} - E[(s_i - xc_i)^+] - R(s_i)} \quad (21)$$

Le problème d'optimisation exposé ci-dessus requiert une recherche à deux dimensions s_i et Q_i et sa résolution exacte est compliquée (Cohen et al. 88).

Rappelons que la fonction coût par période $\overline{C}_i^b(s_i, Q_i)$ est une fonction K-convexe en s_i dans tous les cas où $Q_i \geq 0$ (Wagner et al. 65; Veinott et Wagner 65; Sahin 82). Cohen et al. ont proposé une heuristique (cf. Figure 4.1) pour calculer les valeurs s_i et $Q_i(s_i)$ et ont prouvé sa convergence sous les conditions suivantes :

- La fonction $\Psi^b(s_i, Q_i^*(s_i))$ est croissante en s_i , pour tout $s_i \geq 0$.
- Puisque $Q_i \geq 1$ et Q_i et s_i sont des entiers, l'algorithme arrondit $Q_i^*(s_i)$ à l'entier supérieur.

```

Algorithm
(i) Set  $s_i \leftarrow 0$ 
     $Q_i \leftarrow \text{Max}\{1, \lceil Q_i^*(s_i) \rceil\}$ 
(ii) Set  $Q_1 \leftarrow \text{Max}\{1, \lceil Q_i^*(s_{i+1}) \rceil\}$ 

    Compute  $\delta = \overline{C}_i^b(s_i + 1, Q_1) - \overline{C}_i^b(s_i, Q_i)$ 
    If  $\delta \leq 0$  then set
         $s_i \leftarrow s_i + 1$ 
         $Q_i \leftarrow Q_1$ 
        Go back to (ii) and repeat the step until  $\delta > 0$ .
(iii) TEST: If  $\Psi^b(s_i, Q_i) \geq SD$ , go to END, otherwise, continue
(iv) Set  $s_i \leftarrow s_i + 1$ 
     $Q_i \leftarrow \text{Max}\{1, \lceil Q_i^*(s_{i+1}) \rceil\}$ 
    Go back to TEST
(v) END: STOP, feasible solution has been obtained

```

Figure 4.1. Algorithme de (Cohen et al. 88) pour calculer s_i et Q_i

4.1.4 Passage du modèle simplifié de (Cohen et al. 88) à un modèle à deux détaillants avec transshipment

Comme nous l'avons précisé plus haut, nous avons choisi d'adapter le modèle de Cohen et al. en le considérant pour le cas d'un système à deux détaillants et en le complétant par la prise en compte de la coopération par transshipment. Le modèle résultant devrait nous permettre de cerner certaines caractéristiques de la performance du système de stock avec transshipment, à savoir la quantité de transshipment, la quantité perdue, le coût total et le taux de service. Nous nous situerons toujours dans les hypothèses explicitées en §4.1.2.

4.1.4.1 Espérance mathématique de la quantité de transshipment

En cas de rupture chez le détaillant i durant un cycle d'approvisionnement, la quantité de transshipment qu'il peut obtenir auprès du détaillant j selon la politique complete pooling est donnée par la formule :

$$X_{ji}(xc_i, y_j) = \min \left\{ (xc_i - s_i)^+, y_j \right\} \quad (22)$$

Pour calculer l'espérance mathématique de la quantité de transshipment durant un cycle d'approvisionnement, nous devons connaître les distributions en probabilité de xc_i et de y_j . La distribution de la demande est donnée par la fonction densité de la loi normale. On peut trouver la distribution du niveau de stock y_j en revenant à la relation fondamentale entre le niveau de stock y_j à la période t (arrivée d'un ordre d'approvisionnement), la position de stock z_j à la période $t-L$ (passation d'un ordre d'approvisionnement) et la demande durant le délai d'approvisionnement xL_i (cf. Figure 4.2). On a :

$$y_j(t) = z_j(t-L) - xL_j \quad (23)$$

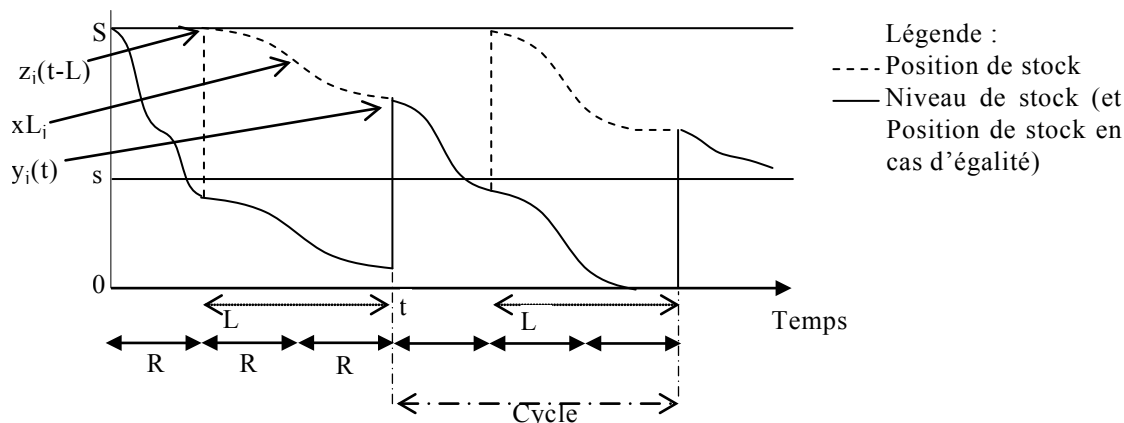


Figure 4.2. Relation entre stock disponible, position de stock et demande durant le délai dans un système de stock (R, s, S) à demandes perdues

En régime stationnaire (i.e. $t \rightarrow \infty$) cette équation devient (Xu 97) :

$$y_j = z_j - xL_j \tag{24}$$

Dans notre cas d'étude, nous avons supposé que la position de stock z_j est toujours comprise entre s_j et S_j . La fonction de distribution cumulative (c.d.f) du niveau de stock y_j est alors donnée par :

$$\begin{aligned} \phi_j(y_j) &= P(Y_j \leq y_j) \\ &= \int_{s_j}^{S_j} \int_{z_j - y_j}^{\infty} u_j(z_j) f_j(xL_j) dxL_j dz_j = \int_{s_j}^{S_j} u_j(z_j) [1 - F_j(z_j - y_j)] dz_j \end{aligned} \tag{25}$$

Hill et Johanssen, dans (Hill et Johanssen 06 ; Johansen et Hill 00), ont mentionné que la distribution de la position de stock dans les modèles (s, S) à demandes perdues est difficile à déterminer à cause du problème d'approximation de $u_j(z_j)$ dans l'intervalle où le niveau de stock atteint la valeur zéro. Nous en déduisons qu'il en est de même pour la politique (R, s, S) à demandes perdues et nous remplaçons la fonction densité de la position de stock (inconnue) par une distribution générale $\phi_j(y_j)$ afin de poursuivre la formulation des expressions mathématiques de notre modèle.

En nous basant sur l'équation (22) et en prenant $\phi_j(y_j)$ comme une distribution générale du niveau de stock, l'espérance mathématique de la quantité de transshipment durant un cycle d'approvisionnement du détaillant i peut être rapprochée par l'expression (26) :

$$\begin{aligned}
E(X_{ji}) &= \int_{s_i}^{\infty} \int_0^{S_j} X_{ji}(xc_i, y_j) \varphi_j(y_j) f_i(xc_i) dy_j dxc_i \\
&= \begin{cases} \int_{s_i}^{s_i+S_j} \int_{xc_i-s_i}^{S_j} (xc_i - s_i) \varphi_j(y_j) f_i(xc_i) dy_j dxc_i & \text{si } y_j \geq (xc_i - s_i) \\ \int_{s_j+y_j}^{\infty} \int_0^{S_j} y_j \varphi_j(y_j) f_i(xc_i) dy_j dxc_i & \text{sinon} \end{cases} \quad (26)
\end{aligned}$$

Le premier terme de cette dernière expression signifie que la requête du transshipment auprès du détaillant i est complètement satisfaite à partir du stock disponible du détaillant j . Le deuxième terme de l'expression signifie que la requête du transshipment auprès du détaillant i n'est que partiellement satisfaite par le stock disponible chez le détaillant j .

4.1.42 Espérance mathématique de la quantité perdue

En permettant les transshipments entre détaillants, le niveau de stock chez le détaillant i durant un cycle n'est plus s_i mais $s_i + X_{ji}$; i.e. le transshipment d'urgence effectué auprès du détaillant j augmente la disponibilité en stock. Rappelons que la demande durant le cycle d'approvisionnement chez un détaillant est indépendante du niveau de stock de l'autre détaillant et que la quantité de transshipment X_{ji} est toujours inférieure à $(xc_i - s_i)$. D'autre part, la réalisation du transshipment par la quantité X_{ji} dépend de xc_i et y_j . En cas de rupture chez le détaillant i (i.e. la demande client surpasse le stock disponible $s_i + X_{ji}$), l'espérance mathématique de la quantité perdue du détaillant i durant un cycle d'approvisionnement est :

$$\begin{aligned}
P(s_i) &= E[(xc_i - (s_i + X_{ji}))^+] \\
&= \int_{s_i}^{\infty} \int_0^{S_j} (xc_i - s_i - X_{ji}(xc_i, y_j)) \varphi_j(y_j) f_i(xc_i) dy_j dxc_i \\
&= \int_{s_i}^{\infty} \int_0^{S_j} (xc_i - s_i) \varphi_j(y_j) f_i(xc_i) dy_j dxc_i - \int_{s_i}^{\infty} \int_0^{S_j} X_{ji}(xc_i, y_j) \varphi_j(y_j) f_i(xc_i) dy_j dxc_i \\
&= R(s_i) - E(X_{ji})
\end{aligned} \quad (27)$$

On vérifie bien que la quantité perdue dans un système avec transshipment est réduite en comparaison avec celle d'un système indépendant. Il reste à évaluer l'impact sur le coût total et le taux de service.

4.1.43 Calcul du coût total

La fonction coût de notre système de stock avec transshipment pour un réseau comprenant deux détaillants prend la forme générale de l'équation (19) avec quelques modifications. Aux trois coûts de rupture, de possession et de commande s'ajoute, maintenant, le coût de transshipment qui est linéaire en fonction de la quantité de transshipment.

Demande moyenne par cycle d'approvisionnement :

La demande moyenne par cycle d'approvisionnement du détaillant i reste invariante et égale à celle d'un détaillant indépendant :

$$S_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i) \quad (28)$$

De même, la longueur moyenne du cycle d'approvisionnement qui en est déduite reste inchangée :

$$\ell_i = \frac{S_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i)}{\mu_i} \quad (29)$$

Calcul du coût de possession :

Tenant compte de la possibilité d'un transshipment du détaillant i vers le détaillant j , le stock disponible avant l'arrivée d'une livraison devient $E[(s_i - xc_i)^+] - E[X_{ij}]$. La quantité moyenne d'approvisionnement restant toujours égale à $S_i - s_i$, le stock moyen après l'arrivée d'une livraison devient $S_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+] - E[X_{ij}]$. Le coût de possession par période est approché par la moyenne des positions minimum et maximum :

$$\frac{ch}{2} (S_i - s_i + 2(E[(s_i - xc_i)^+] - E[X_{ij}])) \quad (30)$$

Calcul du coût total :

Le coût de commande reste fixe et égal à K . Le coût de rupture devient égal à $cp P(s_i)$ au lieu de $cp R(s_i)$ et le coût de transshipment s'évalue à $ct E[X_{ji}]$. Le coût total devient :

$$\overline{C}_i^a(s_i, S_i) = \ell_i \frac{ch}{2} (S_i - s_i + 2(E[(s_i - xc_i)^+] - E[X_{ij}])) + K + cp P(s_i) + ct E[X_{ji}] \quad (31)$$

En divisant par la longueur moyenne ℓ_i du cycle d'approvisionnement, nous obtenons le coût total par période du détaillant i :

$$\overline{C}_i^a(s_i, S_i) = \frac{ch}{2} (S_i - s_i + 2(E[(s_i - xc_i)^+] - E[X_{ij}])) + (K + cp P(s_i) + ct E[X_{ji}]) / \ell_i \quad (32)$$

L'expression du taux de service durant un cycle d'approvisionnement devient comme suit :

$$\begin{aligned}\Psi^a(s_i, S_i) &= 1 - \frac{P(s_i)}{S_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i)} \\ &= \frac{S_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+] + E[X_{ji}]}{S_i - s_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i)}\end{aligned}\quad (33)$$

Comparativement à l'expression $\Psi^b(s_i, S_i)$ donnant le taux de service pour un système sans transshipment (voir équation (18)), cette nouvelle expression confirme l'évidence que le taux de service ne peut être qu'amélioré par l'intégration du transshipment latéral.

Soit $Q_i = S_i - s_i$. Le coût total et le taux de service du détaillant i sont reformulés comme suit :

$$\overline{C_i^a}(s_i, Q_i) = \frac{ch}{2} \left(Q_i + 2(E[(s_i - xc_i)^+] - E[X_{ij}]) \right) + (K + cp P(s_i) + ct E[X_{ji}]) / \ell_i \quad (34)$$

$$\Psi'^a(s_i, Q_i) = \frac{Q_i + E[(s_i - xc_i)^+] + E(X_{ji})}{Q_i + E[(s_i - xc_i)^+] + R(s_i)} \quad (35)$$

Le coût total des deux détaillants i et j est égal à :

$$\begin{aligned}CT(s_i, Q_i, s_j, Q_j) &= \overline{C_i^a}(s_i, Q_i) + \overline{C_j^a}(s_j, Q_j) = \\ &= \frac{ch}{2} \left(Q_i + 2(E[(s_i - xc_i)^+] - E[X_{ij}]) \right) + (K + cp P(s_i) + ct E[X_{ji}]) / \ell_i + \\ &+ \frac{ch}{2} \left(Q_j + 2(E[(s_j - xc_j)^+] - E[X_{ji}]) \right) + (K + cp P(s_j) + ct E[X_{ij}]) / \ell_j\end{aligned}\quad (36)$$

Nous proposons de reformuler l'expression du coût total comme suit :

$$CT(s_i, Q_i, s_j, Q_j) = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (37)$$

avec :

$$C_1 = \frac{ch}{2} \left(Q_i + 2E[(s_i - xc_i)^+] \right) + \frac{K + cp R(s_i)}{\ell_i} \quad (38)$$

$$C_2 = \frac{ch}{2} \left(Q_j + 2E[(s_j - xc_j)^+] \right) + \frac{K + cp R(s_j)}{\ell_j} \quad (39)$$

$$C_3 = \frac{E[X_{ji}]}{\ell_i} [-ch \ell_i - cp + ct] \quad (40)$$

$$C_4 = \frac{E[X_{ij}]}{\ell_j} [-ch \ell_j - cp + ct] \quad (41)$$

Les expressions de C_1 et C_2 représentent les coûts dans un système indépendant. Les expressions de C_3 et C_4 indiquent les coûts liés aux transshipments dans les deux sens (transshipment bidirectionnel). Dans ce cas, les transshipments entre détaillants peuvent réduire les coûts sous conditions que :

$$-ch \ell_i - cp + ct \leq 0 \quad (42)$$

$$-ch \ell_j - cp + ct \leq 0 \quad (43)$$

Dans la pratique, nous avons $cp - ct > 0$, du fait que le transshipment est censé apaiser le coût de rupture. Ainsi, les conditions (42) et (43) sont satisfaites.

A ce stade, il se confirme clairement que le transshipment d'une unité depuis le détaillant i vers le détaillant j (ou inversement) a pour conséquences :

- de réduire le coût de rupture chez le détaillant j , le coût de rupture chez le détaillant i restant le même.
 $cp P(s_j) = cp (R(s_j) - E[X_{ij}])$
- d'ajouter, en contrepartie, un coût de transshipment égal à :
 $ct E[X_{ij}]$
- de réduire le coût de possession chez le détaillant i , le coût de possession chez le détaillant j restant le même.

$$\frac{ch}{2} \left(Q_i + 2(E[(s_i - xc_i)^+] - E[X_{ij}]) \right)$$

Le gain, formulé par les expressions C_3 et C_4 , évolue avec l'augmentation de la quantité de transshipment. Afin de minimiser le coût total du système donné par l'équation (36), nous commençons par examiner les points d'inflexion (i.e. points où les dérivées partielles de premier ordre s'annulent). Puisque les notations i et j sont interchangeables, il suffit de dériver, par exemple, par rapport à Q_i .

$$Q_i^*(s_i) = \sqrt{\frac{\mu_i [K + cp R(s_i) + E[X_{ji}] (-cp + ct)]}{ch/2}} - E[(s_i - xc_i)^+] - R(s_i) \quad (44)$$

Au vu de cette équation, nous remarquons que la quantité de commande dans un système avec transshipment est réduite au regard de la quantité de commande dans un système sans transshipment (équation (21)). Cette réduction est due à la sous expression $E[X_{ji}](-cp + ct)$ qui est une quantité négative. Nous pouvons déduire que, même si nous adoptons le même point de commande retenu pour un système indépendant, le transshipment mène à une réduction de la quantité de commande et en conséquence à un abaissement du niveau de reapprovisionnement. Cette quantité de commande croît avec l'augmentation de la demande moyenne (μ_i) par période ainsi qu'avec les coûts de commande (K) et de rupture (cp) alors qu'elle décroît avec l'augmentation du coût de possession (ch).

4.1.5 Limites de la solution obtenue

En fait, ces conclusions sont déduites à partir d'une étude analytique du modèle que nous avons construit qui, bien que simplifié sur certains aspects, demeure complexe et très difficile à résoudre. En particulier, parce que la distribution de la position de stock est inconnue dans l'expression de l'espérance mathématique de la quantité de transshipment $E[X_{ji}]$, la valeur de Q_i^* (équation (44)) ne peut être déterminée. Ceci nous conduit à recourir à une approche par simulation-optimisation qui nous a donné la possibilité, à la fois, de relaxer les hypothèses restrictives considérées dans le modèle mathématique et d'analyser d'une façon plus fine les apports du transshipment et sa sensibilité à différents paramètres (écart type, délai d'approvisionnement, divers coûts) et combinaisons des paramètres.

Nous décrivons, dans la section suivante, la démarche de résolution retenue et le modèle de simulation-optimisation.

4.2 Approche par simulation-optimisation

4.2.1 Analogie des notations utilisées entre le modèle mathématique et le modèle de simulation

Modélisation mathématique		Modélisation par simulation	
Notation	Désignation	Notation	Désignation
x_i	Demande durant une période élémentaire chez le détaillant i (variable stochastique)	$d_{i,t}$	Demande aléatoire (loi normale) chez le détaillant i à la période t
y_j	Niveau du stock chez le détaillant j au début du cycle d'approvisionnement	$IL_{i,t}^b$ $IL_{i,t}^a$	Niveau de stock chez le détaillant i au début de la période t Niveau de stock chez le détaillant i à la fin de la période t
z_j	Position du stock chez le détaillant j au début du cycle d'approvisionnement	$IP_{i,t}^b$ $IP_{i,t}^a$	Position de stock chez le détaillant i au début de la période t Position de stock chez le détaillant i à la fin de la période t
X_{ij}	Quantité du transshipment effectuée depuis le détaillant i vers le détaillant j durant un cycle d'approvisionnement	$X_{ij,t}$	Quantité du transshipment effectuée depuis le détaillant i vers le détaillant j durant la période t

$R(s_i)$	Espérance mathématique de la quantité de rupture chez le détaillant i durant un cycle d'approvisionnement	$QR_{i,t}$	Quantité de rupture chez le détaillant i à la période t
$P(s_i)$	Espérance mathématique de la demande perdue par le détaillant i durant un cycle d'approvisionnement	$QP_{i,t}$	Demande perdue par le détaillant i à la période t
Q_i	Quantité de commande passée par la détaillant i durant un cycle d'approvisionnement	$Q_{i,t}$	Quantité de commande passée par la détaillant i durant la période t
$\Psi^b(s_i, S_i)$	Taux de service durant un cycle d'approvisionnement du détaillant i dans un système indépendant	β^b	Taux de service sur l'horizon T périodes du détaillant i dans un système indépendant
$\Psi^a(s_i, S_i)$	Taux de service durant un cycle d'approvisionnement du détaillant i dans un système avec transshipment	β^a	Taux de service sur l'horizon T périodes des détaillants dans un système avec transshipment

Tableau 4.1. Analogie entre le modèle mathématique et le modèle de simulation

Dans ce qui suit, nous allons exposer successivement :

- les différentes politiques de transshipment explorées dans le présent travail ;
- la formulation du modèle de stock pour la simulation ;
- la fonction objectif pour l'optimisation ;
- les résultats numériques des expérimentations effectuées.

4.2.2 Les politiques de transshipment explorées

Quatre politiques de transshipment ont été explorées. Les deux premières (tout ou rien et complete pooling) sont tirées de la littérature (voir chapitre 3). Les deux autres sont des propositions personnelles qui nous ont parues intéressantes à en étudier le comportement.

- La politique tout ou rien :

Le transshipment est effectué selon une décision tout ou rien. En d'autres termes, le transshipment n'est effectué que si le stock disponible chez le détaillant sollicité est suffisant pour combler le reste de la demande client chez le détaillant en rupture de stock.

$$X_{j,i,t} = \begin{cases} d_{i,t} - IL_{i,t}^b & \text{si } 0 < d_{i,t} - IL_{i,t}^b \leq IL_{j,t}^b - d_{j,t} \\ 0 & \text{si } d_{i,t} - IL_{i,t}^b < 0 \text{ ou } 0 \leq IL_{j,t}^b - d_{j,t} < d_{i,t} - IL_{i,t}^b \end{cases} \quad (45)$$

- La politique complete pooling :

Selon la politique complete pooling, un détaillant accepte de transférer tout son stock disponible en cas de besoin, même si ce stock ne suffit pas à combler toute la demande client qui est à l'origine de la requête de transshipment.

$$X_{j,i,t} = \begin{cases} d_{i,t} - IL_{i,t}^b & \text{si } 0 < d_{i,t} - IL_{i,t}^b \leq IL_{j,t}^b - d_{j,t} \\ IL_{j,t}^b - d_{j,t} & \text{si } 0 < IL_{j,t}^b - d_{j,t} < d_{i,t} - IL_{i,t}^b \\ 0 & \text{si } d_{i,t} - IL_{i,t}^b \leq 0 \text{ ou } \max(0, IL_{j,t}^b - d_{j,t}) = 0 \end{cases}$$

$$= \min \left\{ \left(d_{i,t} - IL_{i,t}^b \right)^+, \left(IL_{j,t}^b - d_{j,t} \right)^+ \right\} \quad (46)$$

- La politique complete pooling conditionné :

Dans le cas où le coût de transshipment est fixe et indépendant de la quantité, nous proposons une variante de la politique complete pooling que nous appelons complete pooling conditionné. Cette variante permet d'éviter la réalisation du complete pooling de manière systématique et ce, en introduisant une condition qui tient compte des différents coûts de gestion. Nous avons, ainsi, adopté que le complete pooling n'est effectué que si son coût fixe est inférieur à la somme des coûts de possession et de rupture pour la même quantité de transshipment.

$$X_{j,i,t} = \begin{cases} \min \left\{ \left(d_{i,t} - IL_{i,t}^b \right)^+, IL_{j,t}^b \right\} & \text{si } ct \leq (cp + ch) * X_{j,i,t} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (47)$$

La condition $ct \leq (cp + ch) * X_{j,i,t}$ correspond à la condition de gain donnée par l'expression (42) pour le pire cas (i.e. $\ell_i = 1$).

- La politique complete pooling plafonné:

Dans cette politique, une capacité maximum (Q_{\max}) est imposée pour le transshipment. Autrement dit, le complete pooling est effectué si la quantité $X_{j,i,t}$ est inférieure à la quantité Q_{\max} , sinon le transshipment se limitera à la quantité Q_{\max} . En pratique, la capacité Q_{\max} peut être, par exemple, la capacité maximum du moyen de transport.

$$X_{j,i,t} = \begin{cases} \min \left(\left(d_{i,t} - IL_{i,t}^b \right)^+, Q_{\max} \right) & \text{si } d_{i,t} - IL_{i,t}^b \leq IL_{j,t}^b - d_{j,t} \\ \min \left(\left(IL_{j,t}^b - d_{j,t} \right)^+, Q_{\max} \right) & \text{sinon} \end{cases} \quad (48)$$

4.2.3 Modèle de stock (R, s, S) à demandes perdues intégrant le transshipment

Les modèles pour le détaillant i et le détaillant j sont identiques moyennant une permutation de i et de j. Nous ne donnons, donc, que le modèle pour le détaillant i. Ce modèle est spécifié pour T périodes (1, 2, 3, ..., T). Au démarrage (i.e. période 1),

nous supposons qu'il n'y a pas de passation de commande chez les détaillants et que le niveau de stock et la position de stock sont initialisés à une valeur S_i^0 déterminée par une heuristique (détails dans la section 4.2.5). Les périodes sont traitées dans l'ordre et, à chacune d'elles, nous effectuons la séquence des cinq opérations suivantes :

1- *Réception de commande* : Au début de chaque période t , si une commande d'approvisionnement est reçue par le détaillant, alors elle est ajoutée au niveau de stock : $IL_{i,t}^b \leftarrow IL_{i,t}^b + Q_{i,t-L_i-1}$.

2- *Arrivée des demandes clients* : Deux cas distincts sont considérés pour le calcul du niveau et de la position de stock. Ainsi, $IL_{i,t}^b$ et $IP_{i,t}^b$ sont actualisés comme suit :

Cas 1: Si $d_{i,t} \leq IL_{i,t}^b$ alors $IL_{i,t}^b \leftarrow IL_{i,t}^b - d_{i,t}$; $IP_{i,t}^b \leftarrow IP_{i,t}^b - d_{i,t}$

Cas 2: Si $IL_{i,t}^b < d_{i,t}$ alors $QR_{i,t} \leftarrow d_{i,t} - IL_{i,t}^b$; $IL_{i,t}^b \leftarrow 0$; $IP_{i,t}^b \leftarrow \max(0, IP_{i,t}^b - d_{i,t})$

3- *Transshipment* : Les décisions de transshipment et les quantités sont décidées par la politique de transshipment considérée.

Si $X_{j,i,t} = QR_{i,t}$ alors calculer le coût de transshipment en fonction de $X_{j,i,t}$,

sinon calculer le coût de transshipment en fonction de $X_{j,i,t}$ et le coût de rupture en fonction de $QP_{i,t} = QR_{i,t} - X_{j,i,t}$.

La position de stock et le niveau de stock après le transshipment sont calculés comme suit :

$$IP_{i,t}^a \leftarrow IP_{i,t}^b - X_{i,j,t} \quad (49)$$

$$IL_{i,t}^a \leftarrow IL_{i,t}^b - X_{i,j,t} \quad (50)$$

$IP_{i,t}^b$ et $IL_{i,t}^b$ étant à leur valeur actualisée par l'opération 2.

4- *Passation de commande* : si la position $IP_{i,t}^a$ est au-dessous de s_i alors

Passer une commande de $Q_{i,t}$ unités ($Q_{i,t} = s_i - IP_{i,t}^a$) au centre de distribution

Enregistrer l'arrivée de cette commande pour la période $t+L_i+1$

Calculer le coût de cette commande

A la fin de la période, calculer la position de stock $IP_{i,t}^a \leftarrow IP_{i,t}^a + Q_{i,t}$.

5- *Fin de traitement de période* :

Calculer le coût de possession sur la base du niveau de stock $IL_{i,t}^a$ à la fin de la période

Calculer le coût total pour la période (coût de commande+coût de possession+coût de rupture+coût de transshipment)

Mettre à jour le niveau de stock et la position de stock :

$$IL_{i,t+1}^b \leftarrow IL_{i,t}^a \quad ; t = 1, \dots, T-1 \quad (51)$$

$$IP_{i,t+1}^b \leftarrow IP_{i,t}^a \quad ; t = 1, \dots, T-1 \quad (52)$$

Les expressions (51) et (52) traduisent l'équilibre des stocks dans le temps.

Ce modèle de gestion de stock avec transshipment, pour deux détaillants, est implémenté sous forme d'un tableur ExcelTM.

Nous décrivons ci-après le modèle d'optimisation correspondant.

4.2.4 Le problème d'optimisation

Les variables de décision :

Dans notre modèle d'optimisation, nous cherchons à déterminer, pour chaque détaillant i , le point de commande s_i et le niveau de reapprovisionnement S_i .

La fonction objectif :

L'objectif est de minimiser le coût total du système de distribution sur un horizon de temps fini de T périodes. Ce coût inclut les coûts de commande, de possession, de rupture et de transshipment :

$$E(CT) = \min_{\substack{(s_i, S_i) \\ i=1,2}} \left(\sum_{i=1}^2 \left(\sum_{t=1}^T \left(K B_{i,t} + ch E(IL_{i,t}^a) + cp E(QP_{i,t}) + ct \sum_{j=1, j \neq i}^2 E(X_{j,i,t}) \right) \right) \right) \quad (53)$$

avec

$$B_{i,t} = \begin{cases} 1 & \text{si le détaillant } i \text{ passe une commande à la période } t \text{ (autrement dit, si } IP_{i,t}^a \leq s_i) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Les contraintes :

$$s_i \geq 0 \quad : \text{ entier positif ou nul} \quad (54)$$

$$S_i \geq 1 \quad : \text{ entier positif} \quad (55)$$

Par ailleurs, nous cherchons à déterminer les paramètres (s_i, S_i) qui minimisent le coût total et ce, sous contrainte de la satisfaction du taux de service désiré minimum SD .

$$\beta^a \geq SD \quad (56)$$

avec

$$\beta^a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T E(QP_{i,t})}{\sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T d_{i,t}} \quad (57)$$

4.2.5 Résolution par simulation-optimisation

4.2.5.1 Modèle de simulation retenu

La résolution du problème repose fondamentalement sur le comportement probabiliste des demandes clients. Il s'agit d'une distribution continue qui suit la loi normale. Parmi les techniques d'échantillonnage qui permettent une exploration des demandes clients, nous avons retenu la simulation de Monte Carlo. Le principe est de sélectionner, pour chaque demande, des valeurs aléatoires déterminées selon une

moyenne et un écart-type. De plus, la demande est générée de manière indépendante dans le temps et entre détaillants.

La simulation permet de mesurer les performances du système. Cependant, notre objectif est celui de l'optimisation. Il nous faut, donc, compléter la simulation par une étape d'optimisation, ce que nous avons choisi de réaliser par l'OptQuest du logiciel Crystal Ball 7.2®.

4.2.52 Calcul des valeurs initiales de la politique (R, s, S)

Avant d'entamer la résolution du problème d'optimisation avec la simulation, une phase d'initialisation est nécessaire. Nous supposons que les détaillants contrôlent leur stock de manière indépendante et nous déterminons, pour chaque détaillant i , les valeurs (s_i^0, S_i^0) . D'après (Silver et al. 98) et (Ehrhardt et Mosier 84), le point de commande basé sur un coût de rupture spécifié est exprimé par :

$$s_i^0 = \mu_{i,L_i+1} + k_i \sigma_{i,L_i+1} \quad (58)$$

avec $\mu_{i,L_i+1} = \mu_i (L_i + 1)$, $\sigma_{i,L_i+1} = \sigma_i \sqrt{(L_i + 1)}$

Le facteur de sécurité k_i étant déterminé par la formule :

$$P_{u \geq}(k_i) = \frac{ch}{ch + cp} \quad (59)$$

Finalement, la valeur initiale du niveau de recombplètement est déterminée comme suit :

$$S_i^0 = s_i^0 + EOQ \quad (60)$$

avec $EOQ = \sqrt{\frac{2K\mu_i}{ch}}$: Quantité économique de commande

4.2.53 Procédure de recherche

La procédure que nous proposons consiste à déterminer, dans un espace de recherche multi dimensions, les paramètres (s_i, S_i) , pour chaque détaillant i , minimisant le coût total (Tlili et al. 08a). Nous délimitons cet espace par des intervalles : $s_i \in [LB_{1,i}, UB_{1,i}]$ et $S_i \in [LB_{2,i}, UB_{2,i}]$. Les bornes de ces intervalles sont choisies comme suit :

- bornes inférieures : $LB_{1,i} = \mu_i L_i$ et $LB_{2,i} = \mu_i (L_i + 1)$;
- bornes supérieures : $UB_{1,i} = s_i^0$ et $UB_{2,i} = S_i^0$ (solutions analytiques obtenues par l'heuristique de (Silver et al. 98)).

Nous avons considéré ces bornes inférieures au lieu de celles données par les équations (54) et (55) et ce, dans le but de réduire l'espace de recherche des combinaisons (s_i, S_i) . Ces valeurs sont également intéressantes du fait que les bornes inférieures ne vérifient pas la contrainte du taux de service ciblé alors que cette contrainte est satisfaite par les bornes supérieures (par comparaison aux équations (58) et (60)). Ainsi, nous sommes sûrs que la solution optimale de $(s_1, S_1) * (s_2, S_2)$ minimisant le coût total, pour les deux détaillants, se trouve dans ces intervalles.

D'un autre côté, et comme nous l'avons rapporté dans le chapitre 2 (§2.4.2), les chercheurs s'accordent sur le fait que le critère de minimisation du coût total pour la politique (R, s, S) d'un seul détaillant n'est pas une fonction convexe (i.e. présente plusieurs minima locaux distincts). Par conséquent, nous devons pousser notre recherche pour déterminer l'optimum global dans ces intervalles. Or, le nombre des couples possibles (s_i, S_i) dans l'espace de recherche est très important. Pour une couverture à moindres itérations, nous déroulons la procédure de recherche en deux étapes. La première étape évalue, selon un schéma prédéfini dans l'OptQuest du logiciel Crystal Ball 7.2® (cf. Annexe), les combinaisons (s_i, S_i) dans les intervalles $[LB_{1,i}, UB_{1,i}]$ et $[LB_{2,i}, UB_{2,i}]$ avec un pas de discrétisation égal à 5. A l'issue de cette étape, nous retenons la solution qui satisfait le taux de service désiré avec le moindre coût. Soit $(s'_1, S'_1) * (s'_2, S'_2)$ cette solution. La deuxième étape effectue la recherche autour de cette solution à l'aide de l'OptQuest, dans un intervalle ± 5 , et avec un pas de discrétisation égal à 1 :

- $LB_{1,i} = s'_i - 5$; $UB_{1,i} = s'_i + 5$
- $LB_{2,i} = S'_i - 5$; $UB_{2,i} = S'_i + 5$

A la fin de cette étape, nous retenons, pour chaque détaillant, la meilleure des solutions obtenues.

Cette procédure peut être appliquée aussi bien à un système sans transshipment (ce qui revient à l'étude du cas d'un seul détaillant) qu'à un système avec transshipment ayant deux détaillants.

Il convient, ici, d'apporter les précisions suivantes :

1- Pour un système sans transshipment, la deuxième étape de notre procédure va s'appliquer à $11 * 11$ couples de valeurs (s, S) . L'OptQuest va pouvoir les évaluer toutes et déterminer la combinaison optimale.

Par contre, pour un système avec transshipment et deux détaillants, la deuxième étape de la procédure va concerner un espace de $(11 * 11)^2$ valeurs, soit plus de 10 000 combinaisons de couples de valeurs $(s_1, S_1) * (s_2, S_2)$. Dans ce cas, OptQuest va procéder par échantillonnage limité à 1000 combinaisons et fournir comme résultat la combinaison qui minimise le coût total tout en satisfaisant le seuil minimum du taux de service désiré. On parle alors de meilleure solution obtenue (i.e. best solution) et non de solution optimale.

2- A notre connaissance, les travaux de la littérature ayant traité du transshipment ont évalué l'apport de celui-ci en comparant leurs résultats à ceux obtenus par des heuristiques déterminant (s, S) dans le cas d'un seul détaillant (par exemples, les heuristiques proposées par (Ehrhardt et Mosier 84 ; Schneider et Ringuest 90 ; Silver et al. 98)).

Dans notre cas, nous entendons effectuer des comparaisons plus précises, dans la mesure où les meilleures solutions obtenues pour des systèmes avec transshipment vont pouvoir être comparées à des combinaisons optimales évaluées par simulation-optimisation pour un système sans transshipment.

3- En définitive, notre démarche globale va consister, d'abord, de partir de la solution analytique $(s^0, s^0 + EOQ)$ proposée par Silver et al. pour calculer avec notre procédure de simulation-optimisation la combinaison optimale (s, S) dans le cas sans transshipment, puis d'utiliser cette combinaison optimale comme solution initiale pour obtenir une meilleure solution dans le cas du transshipment avec la politique du complete pooling ou avec la politique du tout ou rien.

4.3 Expérimentation

4.3.1 Description du cas d'étude

Rappelons que la structure du réseau considéré dans ce chapitre est composée d'un centre de distribution alimentant deux détaillants. Nous avons supposé que les deux détaillants sont confrontés à des demandes aléatoires identiques en moyenne et écart type et que les délais d'approvisionnement peuvent être identiques ou différents. Nous avons étudié la résolution de ce cas d'étude via la procédure de simulation-optimisation en testant successivement les politiques de transshipment « complete pooling » et « tout ou rien ».

Ainsi, 30 exemples différents ont été évalués dont les paramètres d'entrée sont détaillés dans le tableau 4.2. Ces exemples ont été construits par la combinaison des délais (identiques/différents), des coûts de rupture et de transshipment (égaux/différents) et des demandes clients stochastiques (loi normale avec μ_i et σ_i identiques). Aussi, nous avons considéré dans tous ces exemples :

- Service désiré : SD=98%,
- Coût de possession : $ch = 1$,
- Coût de transshipment : $ct = 10$,
- Coût de commande : $K = 100$,
- Horizon de planification : $T = 100$.

Ce qui a conduit au final à 80 problèmes (30 sans transshipment, 30 avec complete pooling et 20 avec tout ou rien).

Exemples	L_1	L_2	μ_i, σ_i	cp respectifs des exemples
1-5	1	1	40,10	100, 75, 50, 25, 10
6-10	1	1	40,20	100, 75, 50, 25, 10
11-15	3	3	40,10	100, 75, 50, 25, 10
16-20	3	3	40,20	100, 75, 50, 25, 10
21-25	1	3	40,10	100, 75, 50, 25, 10
26-30	1	3	40,20	100, 75, 50, 25, 10

Tableau 4.2. Paramètres d'entrée des modèles de simulation

Avec les valeurs de μ_i mentionnées dans ce tableau, nous obtenons, pour les bornes inférieures, les valeurs portées dans le tableau 4.3.

	$LB_{1,i}$ pour s_i	$LB_{2,i}$ pour S_i
$L_i=1$	40	80
$L_i=3$	120	160

Tableau 4.3. Bornes inférieures pour les paramètres (s_i , S_i)

Le tableau 4.4 donne les seuils (s , S) calculés selon (Silver et al. 98) et les seuils obtenus par simulation. Sur ce tableau, nous constatons que, pour tous les exemples, les estimations calculées par (Silver et al. 98) (§ 4.2.52) ont été améliorées par notre procédure de simulation-optimisation. Cette amélioration est de 17% en moyenne

pour s et de 18% en moyenne pour S dans un système sans transshipment. Aussi, les valeurs obtenues (s , S) dans les systèmes avec transshipment se trouvent bien incluses dans les intervalles délimités par les bornes inférieures et les bornes supérieures proposées. Il faut rappeler que Silver et al. a adopté pour ses calculs le modèle de Wilson (cf. Tableau 4.5) selon lequel la valeur de S est approchée par une quantité économique de commande ajoutée à la valeur déterminée pour s . Dans nos travaux, notre procédure de simulation-optimisation nous a donné la possibilité de déterminer séparément les valeurs pour s et S .

Exemple	Solutions analytiques selon (Silver et al. 98)			Solutions par simulation-optimisation					
	k	s	S	Sans transshipment		Complete pooling		Tout ou rien	
				s	S	s	S	s	S
cp=100									
$L_i=1, \sigma_i=10$	2,33	113	202	95	155	83,5	145	85	145
$L_i=1, \sigma_i=20$		146	235	119	195	97,5	176,5	101	184,5
$L_i=3, \sigma_i=10$		207	296	184	244	169	230,5	172	232
$L_i=3, \sigma_i=20$		253	342	219	303	195	275,5	197	278
cp=75									
$L_i=1, \sigma_i=10$	2,22	111	200	93	153	82,5	144	83,5	145
$L_i=1, \sigma_i=20$		143	232	116	192	97	175	98,5	187
$L_i=3, \sigma_i=10$		204	293	180	242	168	230,5	171	232
$L_i=3, \sigma_i=20$		249	338	213	298	192	272,5	194,5	275,5
cp=50									
$L_i=1, \sigma_i=10$	2,06	109	198	90	150	80,5	142,5	82	143,5
$L_i=1, \sigma_i=20$		138	227	111	187	94,5	174	95,5	184,5
$L_i=3, \sigma_i=10$		201	290	176	238	165,5	228	168,5	229
$L_i=3, \sigma_i=20$		242	331	207	291	187	268	193	275
cp=25									
$L_i=1, \sigma_i=10$	1,77	109	198	83	146	77,5	141	78,5	142,5
$L_i=1, \sigma_i=20$		130	219	99	178	89,5	169,5	92	170
$L_i=3, \sigma_i=10$		195	284	168	230	163	227	163	227
$L_i=3, \sigma_i=20$		231	320	192	268	181,5	261,5	183,5	263,5
cp=10									
$L_i=1, \sigma_i=10$	1,34	99	188	74	139	74	139	74	139
$L_i=1, \sigma_i=20$		118	207	93	172	85	166,5	85	165
$L_i=3, \sigma_i=10$		187	276	159	222	159	221	159	220,5
$L_i=3, \sigma_i=20$		213	302	189	267	173,5	253,5	173,5	252,5

$\mu_i=40, ch=1, ct=10, K=100$

Tableau 4.4. Détermination des seuils (s , S) pour les politiques sans transshipment et avec transshipment

Hypothèses de Wilson	Nos hypothèses
Demande connue et constante	Demande aléatoire
Délai d'approvisionnement nul	Délai d'approvisionnement non nul
Rupture interdite	Demande peut être perdue
Coût de commande fixe	Coût de commande fixe
Coût de possession par unité et par période	Coût de possession par unité et par période

Tableau 4.5. Comparaison des hypothèses entre notre modèle et celui de Wilson

4.3.2 Analyse des apports du transshipment

Les mesures de performance que nous avons considérées dans l'évaluation de l'apport du transshipment sont :

- Le nombre de commandes d'approvisionnement, noté par $Nb_c ds$.
- Le taux de service global chez les détaillants :

$$\beta^a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T E(QP_{i,t})}{\sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T d_{i,t}} \quad (61)$$

- Le coût total chez les détaillants : $E(CT)$
- Le taux de transshipment chez les détaillants :

$$TR = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T X_{i,j,t}}{\sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T (d_{i,t} - QP_{i,t})} \quad (62)$$

Les résultats des différentes simulations sont rapportés dans les tableaux 4.5 à 4.10. Nous allons les commenter en trois étapes. En première étape, nous comparons les résultats des systèmes avec transshipment vs. ceux du système sans transshipment. En deuxième étape, nous examinons, pour les 20 premiers exemples, les performances de la politique complete pooling vs. celles de la politique tout ou rien. En troisième étape, nous commentons, pour tous les exemples, l'effet de l'écart type de la demande (σ_i) ainsi que l'effet du délai d'approvisionnement (L_i) sur les performances d'un système avec transshipment.

4.3.21 Système avec transshipment vs. système sans transshipment

Le tableau 4.6 situe les résultats de l'évaluation des performances des politiques de transshipment complete pooling et transshipment tout ou rien par rapport à ceux de la politique sans transshipment. Nous constatons, d'abord, que ces résultats vérifient ceux déjà obtenus par le modèle mathématique au paragraphe §4.1.4, pour un système de stock à deux détaillants identiques et indépendamment des valeurs de σ_i et L_i , à savoir que :

- les seuils (s , S) décroissent avec la réduction du coût de rupture (cf. équation (44) et Tableau 4.5).
- lorsque la condition $ct < ch + cp$ est vérifiée de façon nette, les politiques avec transshipment sont plus avantageuses que la politique sans transshipment. Elles diminuent les seuils (s , S) et le coût total moyen en même temps qu'elles améliorent le taux de service.

Des cas limites apparaissent quand le coût de transshipment avoisine le coût de rupture. Dans l'expérimentation que nous avons effectuée, nous avons constaté ces cas limites sur deux exemples où $cp = ct$. Pour ces deux exemples, nous avons obtenu quasiment les mêmes seuils s et S avec, cependant, un léger avantage à la politique sans transshipment sur le plan du coût total contre un léger avantage pour les politiques avec transshipment sur le plan du taux de service. L'analyse fine nous a permis de relever les chiffres suivants :

- Sur l'exemple 5 dans le tableau 4.5 : cas de deux détaillants avec $cp=ct=10$, $\sigma_i=10$, $L_i=1$, $K=100$, $T=100$, la simulation a fourni les valeurs moyennes suivantes :
 - Nombre de commandes sans transshipment = 92.35
Nombre de commandes avec transshipment en complete pooling = 92.98 (+0.68%)
Nombre de commandes avec transshipment en tout ou rien = 92.89 (+0.58%)
 - Coût de commande sans transshipment = 9235
Coût de commande avec transshipment en complete pooling = 9298 (+0.68%)
Coût de commande avec transshipment en tout ou rien = 9289 (+0.58%)
 - Coût de possession sans transshipment = 7907
Coût de possession avec transshipment en complete pooling = 7654 (-3.19%)
Coût de possession avec transshipment en tout ou rien = 7679 (-2.88%)
 - Coût de rupture sans transshipment = 1567
Coût de rupture avec transshipment en complete pooling = 251 (-83.98%)
grâce à l'apport d'un coût moyen de transshipment = 1599
Coût de rupture avec transshipment en tout ou rien = 388 (-75.24%) grâce à l'apport d'un coût moyen de transshipment = 1457.

- Sur l'exemple 15 dans le tableau 4.5 : cas de deux détaillants avec $cp=ct=10$, $\sigma_i=10$, $L_i=3$, $K=100$, $T=100$, la simulation a fourni les valeurs moyennes suivantes :
 - Nombre de commandes sans transshipment = 93,74
Nombre de commandes avec transshipment en complete pooling = 95.17 (+1.53%)
Nombre de commandes avec transshipment en tout ou rien = 95.55 (+1.93%)
 - Coût de commande sans transshipment = 9374
Coût de commande avec transshipment en complete pooling = 9517 (+1.53%)
Coût de commande avec transshipment en tout ou rien = 9555 (+1.93%)
 - Coût de possession sans transshipment = 9442
Coût de possession avec transshipment en complete pooling = 8824 (-6.55%)
Coût de possession avec transshipment en tout ou rien = 8815 (-6.64%)
 - Coût de rupture sans transshipment = 1568
Coût de rupture avec transshipment en complete pooling = 315 (-79.91%)
grâce à l'apport d'un coût moyen de transshipment = 1929
Coût de rupture avec transshipment en tout ou rien = 492 (-68.62%) grâce à l'apport d'un coût moyen de transshipment = 1680.

Nous constatons, à travers ces chiffres, que le coût de possession a tendance à diminuer (ce qui s'explique par le fait que le transshipment diminue les stocks), alors que le nombre des commandes a tendance à augmenter (ce qui s'explique par le réflexe de l'approvisionnement à réagir face à un écoulement plus rapide des stocks). Ces tendances restent néanmoins peu significatives. Quant au coût du transshipment qui apparaît comme étant légèrement supérieur au coût de rupture sans transshipment, il s'explique par un surplus apporté au taux de service.

Fait très rassurant à souligner est que l'augmentation de l'écart type redonne un avantage net aux politiques avec transshipment (cas des exemples 10 et 20 obtenus, respectivement, à partir des exemples 5 et 15 en faisant passer σ_i de la valeur 10 à la

valeur 20). L'incertitude sur la demande donne, donc, de l'intérêt à la politique de transshipment.

%Diff	Complete pooling vs. Sans transshipment					Tout ou rien vs. Sans transshipment				
	s	S	β	$E(CT)$	Nb_cds	s	S	β	$E(CT)$	Nb_cds
Exemple	cp=100									
1 : $L_i=1, \sigma_i=10$	-12,11	-6,45	0,08	-10,31	-2,04	-10,53	-6,45	0,05	-8,86	-1,02
6 : $L_i=1, \sigma_i=20$	-18,07	-9,49	0,14	-14,73	-1,25	-15,13	-5,38	0,12	-12,86	-6,25
11 : $L_i=3, \sigma_i=10$	-8,15	-5,53	0,11	-12,03	-2,04	-6,52	-4,92	0,09	-10,43	-1,02
16 : $L_i=3, \sigma_i=20$	-10,96	-9,08	0,23	-16,71	4,05	-10,05	-8,25	0,16	-14,44	4,05
	cp=75									
2 : $L_i=1, \sigma_i=10$	-11,29	-5,88	0,12	-9,56	-2,04	-10,22	-5,23	0,09	-8,37	-2,04
7 : $L_i=1, \sigma_i=20$	-16,38	-8,85	0,21	-13,9	-1,25	-15,09	-2,6	0,19	-11,97	-10
12 : $L_i=3, \sigma_i=10$	-6,67	-4,75	0,19	-11,06	-1,04	-5	-4,13	0,17	-9,69	0
17 : $L_i=3, \sigma_i=20$	-9,86	-8,56	0,34	-15,55	4,05	-8,69	-7,55	0,27	-13,46	4,05
	cp=50									
3 : $L_i=1, \sigma_i=10$	-10,56	-5	0,21	-8,31	-2,04	-8,89	-4,33	0,18	-7,34	-2,04
8 : $L_i=1, \sigma_i=20$	-14,86	-6,95	0,36	-12,18	-2,5	-13,96	-1,34	0,31	-10,37	-10
13 : $L_i=3, \sigma_i=10$	-5,97	-4,2	0,29	-9,37	-1,04	-4,26	-3,78	0,27	-8,27	1,04
18 : $L_i=3, \sigma_i=20$	-9,66	-7,9	0,47	-13,48	4,05	-6,76	-5,5	0,47	-11,65	2,7
	cp=25									
4 : $L_i=1, \sigma_i=10$	-6,63	-3,42	0,56	-5,41	0	-5,42	-2,4	0,49	-4,74	0
9 : $L_i=1, \sigma_i=20$	-9,6	-4,78	1,01	-8,05	0	-7,07	-4,49	0,89	-7,04	1,28
14 : $L_i=3, \sigma_i=10$	-2,98	-1,3	0,76	-5,7	-2,08	-2,98	-1,3	0,63	-5,07	-2,08
19 : $L_i=3, \sigma_i=20$	-5,47	-2,43	1,29	-8,45	-2,5	-4,43	-1,68	1,11	-7,51	-2,5
	cp=10									
5 : $L_i=1, \sigma_i=10$	0	0	1,67	0,49	1,09	0	0	1,5	0,55	1,09
10 : $L_i=1, \sigma_i=20$	-8,6	-3,2	1,52	-1,18	-2,56	-8,6	-4,07	1,16	-1,28	-1,28
15 : $L_i=3, \sigma_i=10$	0	-0,45	1,59	0,99	0	0	-0,68	1,36	0,77	2,13
20 : $L_i=3, \sigma_i=20$	-8,2	-5,06	1,17	-2,79	-1,28	-8,2	-5,43	0,66	-3,23	0

$\mu_i=40, ch=1, ct=10, K=100$

Tableau 4.6. Évaluation des performances des politiques "avec transshipment" vs. "sans transshipment", $L_1=L_2$

4.3.22 Complete pooling vs. Tout ou rien

Les valeurs comparatives obtenues par simulation pour les deux politiques complete pooling et tout ou rien sont rapportées dans le tableau 4.7.

Dans la majorité des cas, ces valeurs confirment l'évidence de l'avantage de la politique complete pooling sur le plan de la réduction des seuils et sur le plan de la réduction du coût total et ce, pour des taux de service quasi identiques. Nous constatons que le passage d'un écart type de 10 à 20 avec $L_i=1$ fait augmenter le nombre de commandes. Ceci peut s'expliquer par la diminution du niveau de recomplètement (S) qui conduit normalement à passer des commandes avec de petites quantités et de façon plus fréquente.

Nous observons aussi, dans les exemples 10, 15 et 20 où $cp=ct$, que la politique tout ou rien a un très léger avantage en coût total avec des seuils de stock quasi identiques. Ceci s'explique par le fait que le complete pooling est moins contraignant que le tout ou rien et, quand $cp=ct$, tout transshipment va engendrer un surcoût d'approvisionnement et donc une augmentation du coût total. Cela est moins sensible dans le cas de l'exemple 5. En fait, en passant de l'exemple 5 à n'importe lequel des exemples 10, 15 et 20, on fait augmenter les taux de transshipment, soit parce que on augmente l'incertitude sur la demande ($\sigma_i=10 \rightarrow 20$) soit parce que on augmente les délais d'approvisionnement ($L_i=1 \rightarrow 3$).

%Diff	Complete pooling vs. Tout ou rien					
	s	S	β	$E(CT)$	Nb_cds	TR
Exemple	cp=100					
1 : $L_i=1, \sigma_i=10$	-1,80	0,00	0,03	-1,62	-1,04	15,31
6 : $L_i=1, \sigma_i=20$	-3,59	-4,53	0,02	-2,19	5,06	21,18
11 : $L_i=3, \sigma_i=10$	-1,78	-0,65	0,02	-1,82	-1,04	28,02
16 : $L_i=3, \sigma_i=20$	-1,03	-0,91	0,06	-2,73	0,00	19,99
	cp=75					
2 : $L_i=1, \sigma_i=10$	-1,21	-0,69	0,03	-1,32	0,00	17,55
7 : $L_i=1, \sigma_i=20$	-1,55	-6,86	0,03	-2,24	8,86	23,32
12 : $L_i=3, \sigma_i=10$	-1,79	-0,65	0,02	-1,54	-1,05	26,64
17 : $L_i=3, \sigma_i=20$	-1,30	-1,10	0,07	-2,48	0,00	22,71
	cp=50					
3 : $L_i=1, \sigma_i=10$	-1,86	-0,70	0,03	-1,06	0,00	20,55
8 : $L_i=1, \sigma_i=20$	-1,06	-6,03	0,06	-2,06	7,69	20,77
13 : $L_i=3, \sigma_i=10$	-1,81	-0,44	0,02	-1,22	-2,11	28,54
18 : $L_i=3, \sigma_i=20$	-3,21	-2,61	0,00	-2,12	1,30	33,11
	cp=25					
4 : $L_i=1, \sigma_i=10$	-1,29	-1,06	0,07	-0,71	0,00	14,73
9 : $L_i=1, \sigma_i=20$	-2,79	-0,29	0,12	-1,09	-1,28	20,87
14 : $L_i=3, \sigma_i=10$	0,00	0,00	0,13	-0,66	0,00	11,51
19 : $L_i=3, \sigma_i=20$	-1,10	-0,76	0,18	-1,03	0,00	21,23
	cp=10					
5 : $L_i=1, \sigma_i=10$	0,00	0,00	0,17	-0,06	0,00	8,75
10 : $L_i=1, \sigma_i=20$	0,00	0,90	0,35	0,11	-1,32	11,53
15 : $L_i=3, \sigma_i=10$	0,00	0,23	0,22	0,22	-2,13	12,73
20 : $L_i=3, \sigma_i=20$	0,00	0,39	0,50	0,45	-1,30	16,86

$\mu_i=40, ch=1, ct=10, K=100$

Tableau 4.7. Évaluation des performances de complete pooling vs. tout ou rien

4.3.23 Effets de l'écart type et du délai d'approvisionnement

Nous étudions, pour les politiques complete pooling et tout ou rien, les effets de l'écart type de la demande et du délai d'approvisionnement sur les performances dans les système de stock à détaillants identiques en écart type et délai d'approvisionnement et dans les systèmes de stock à détaillants identiques en écart type mais non identiques en délai d'approvisionnement.

En fait, les résultats que nous avons obtenus pour le tout ou rien ont confirmé les mêmes tendances que nous avons constatées sur les résultats obtenus pour le complete pooling. Ce pourquoi, nous nous contentons, ici, de présenter et commenter les résultats du complete pooling uniquement.

4.3.231 Effet de l'écart type de la demande

Nous examinons, dans un système à détaillants identiques, l'impact de la variation de l'écart type σ_i de 10 à 20 en fixant le délai d'approvisionnement L_i à une période ou à 3 périodes.

Les résultats de simulation présentés dans les tableaux 4.8 et 4.9 montrent qu'une variation élevée de la demande agit principalement sur l'augmentation des seuils (s, S) en valeurs et en différences (S-s) et conduit, par conséquent, à une réduction du nombre de commandes avec des taux de service presque proches.

Fait remarquable est que, en passant de $\sigma_i=10$ à $\sigma_i=20$, les seuils s et S augmentent de façon légèrement différente vis-à-vis de la variation du coût de rupture $c_p=100 \rightarrow 10$, en maintenant, dans tous les cas, la même différence S-s.

Exemple	Complete pooling								
	s			S			β^a		
	$\sigma_i=10$	$\sigma_i=20$	%Diff ↑	$\sigma_i=10$	$\sigma_i=20$	%Diff ↑	$\sigma_i=10$	$\sigma_i=20$	%Diff ↓
cp	$L_1=L_2=1$								
100	83,5	97,5	16,77	145	176,5	21,72	99,93	99,86	-0,07
75	82,5	97	17,58	144	175	21,53	99,92	99,85	-0,07
50	80,5	94,5	17,39	142,5	174	22,11	99,88	99,8	-0,08
25	77,5	89,5	15,48	141	169,5	20,21	99,81	99,66	-0,15
10	74	85	14,86	139	166,5	19,78	99,69	99,5	-0,19
	$L_1=L_2=3$								
100	169	195	15,38	230,5	275,5	19,52	99,88	99,84	-0,06
75	168	192	14,29	230,5	272,5	18,22	99,89	99,79	-0,1
50	165,5	187	12,99	228	268	17,54	99,83	99,69	-0,14
25	163	181,5	11,35	227	261,5	15,2	99,79	99,51	-0,28
10	159	173,5	9,12	221	253,5	14,71	99,61	99,15	-0,46

$\mu_i=40, ch=1, ct=10, K=100$

Tableau 4.8. Sensibilité des paramètres de stock à l'écart type

4.3.232 Effet du délai d'approvisionnement

Nous examinons, dans un système à détaillants identiques, l'impact de la variation du délai d'approvisionnement L_i d'une période à 3 périodes en fixant l'écart type σ_i à 10 ou à 20. Les résultats exposés dans le tableau 4.10 montrent que l'allongement du délai d'approvisionnement provoque l'augmentation des seuils s et S avec un taux plus important pour s que pour S. Pour l'expérimentation que nous avons effectuée, le passage de L_i de 1 à 3 fait augmenter approximativement s de 100% et S de 60%. Cette augmentation des seuils conduit à une augmentation des coûts de possession et, donc, du coût total. Le nombre moyen de commandes reste sensiblement le même.

Exemple	Complete pooling								
	$E(CT_i)$			Nb_cds			TR		
	$\sigma_i=10$	$\sigma_i=20$	%Diff ↑	$\sigma_i=10$	$\sigma_i=20$	%Diff ↓	$\sigma_i=10$	$\sigma_i=20$	%Diff ↑
cp	$L_1=L_2=1$								
100	197,16 €	237,80 €	20,61	96	79	-17,71	1,52	2,76	81,81
75	195,68 €	234,45 €	19,81	96	79	-17,71	1,72	3,16	83,89
50	193,67 €	230,79 €	19,16	96	78	-18,75	2,14	3,69	72,47
25	190,74 €	225,58 €	18,27	94	78	-17,02	2,87	5,01	74,49
10	188,02 €	220,59 €	17,32	93	76	-18,28	4	6,42	60,78
	$L_1=L_2=3$								
100	218,17 €	276,58 €	26,77	96	77	-19,79	2,07	3,35	61,59
75	216,12 €	272,76 €	26,21	95	77	-18,95	2,24	3,9	74,08
50	213,56 €	267,63 €	25,32	95	77	-18,95	2,83	4,81	70,02
25	209,54 €	260,01 €	24,08	94	78	-17,02	3,35	6,18	84,45
10	205,85 €	252,02 €	22,43	94	77	-18,09	4,81	8,45	75,64

$\mu_i=40, ch = 1, ct = 10, K = 100$

Tableau 4.9. Sensibilité des performances à l'écart type

%Diff Exemple	$s \uparrow$	$S \uparrow$	$\beta^a \downarrow$	$E(CT) \uparrow$	Nb_cds $\downarrow \uparrow$	TR \uparrow
cp	$\sigma_1=\sigma_2=10$					
100	102,4	58,97	-0,03	10,65	0	36,62
75	103,64	60,07	-0,03	10,44	-1,04	30,51
50	105,59	60	-0,05	10,27	-1,04	32,24
25	110,32	60,99	-0,02	9,86	0	16,66
10	114,86	58,99	-0,08	9,49	1,08	20,48
	$\sigma_1=\sigma_2=20$					
100	100	48,12	-0,05	16,39	-2,53	21,42
75	97,94	55,71	-0,06	16,34	-2,53	23,54
50	97,88	54,02	-0,11	15,96	-1,28	30,36
25	102,79	54,28	-0,15	15,26	0	23,32
10	104,12	52,25	-0,35	14,25	1,32	31,61

$\mu_i=40, ch = 1, ct = 10, K = 100$

Tableau 4.10. Sensibilité des performances au délai d'approvisionnement

4.3.233 Système symétrique vs. système asymétrique en délais d'approvisionnement

Nous examinons le complete pooling dans les systèmes où les détaillants sont identiques/différents en délais d'approvisionnement. Nous désignons tout système identique en délais par "système symétrique" et tout système non identique en délais par "système asymétrique". Pour les systèmes symétriques, nous notons, par S1, le cas du système où $L_i=1$ ($i=1, 2$) et, par S2, le cas du système où $L_i=3$ ($i=1, 2$). Le système asymétrique est noté par S3 pour le cas où $L_1=1$ et $L_2=3$. De plus, afin de pouvoir comparer ces deux systèmes, nous considérons les « seuils totaux » de stocks $Tot_s=s_1+s_2$ et $Tot_S=S_1+S_2$.

Performances	L ₁ =L ₂ =1 (S1)	L ₁ =L ₂ =3 (S2)	L ₁ =1, L ₂ =3 (S3)	%Diff S3 vs. S1		%Diff S3 vs. S2	
				Unités	%Diff	Unités	%Diff
cp=100							
Tot_s	167	338	253	86	51,50	-85	-25,15
Tot_S	290	461	375	85	29,31	-86	-18,66
$\overline{E(CT)}$	197,16 €	218,17 €	208,19 €	11,03	5,59	-9,98	-4,57
β^a	99,93	99,90	99,91	-0,02	-0,02	0,02	0,02
Nb_cmds	96	96	97	1,00	1,04	1,00	1,04
TR_D1	0,74	1,03	0,76	0,02	2,60	-0,27	-26,55
TR_D2	0,78	1,04	1,11	0,33	43,04	0,07	6,98
cp=75							
Tot_s	165	336	250	85	51,52	-86	-25,60
Tot_S	288	461	372	84	29,17	-89	-19,31
$\overline{E(CT)}$	195,68 €	216,12 €	205,54 €	9,86	5,04	-10,57	-4,89
β^a	99,92	99,89	99,90	-0,02	-0,02	0,01	0,01
Nb_cmds	96	95	96	0,00	0,00	1,00	1,05
TR_D1	0,78	1,18	0,78	0,00	0,42	-0,39	-33,39
TR_D2	0,94	1,06	1,23	0,30	31,63	0,17	15,87
cp=50							
Tot_s	161	331	246	85	52,80	-85	-25,68
Tot_S	285	456	369	84	29,47	-87	-19,08
$\overline{E(CT)}$	193,67 €	213,56 €	203,18 €	9,51	4,91	-10,37	-4,86
β^a	99,88	99,83	99,86	-0,02	-0,02	0,03	0,03
Nb_cmds	96	95	96	0,00	0,00	1,00	1,05
TR_D1	1,11	1,52	1,07	-0,04	-3,45	-0,45	-29,41
TR_D2	1,03	1,31	1,37	0,34	33,43	0,06	4,79
cp=25							
Tot_s	155	326	241	86	55,48	-85	-26,07
Tot_S	282	454	366	84	29,79	-88	-19,38
$\overline{E(CT)}$	190,74 €	209,54 €	199,75 €	9,01	4,73	-9,79	-4,67
β^a	99,81	99,79	99,80	-0,01	-0,01	0,01	0,01
Nb_cmds	94	94	95	1,00	1,06	1,00	1,06
TR_D1	1,51	1,63	1,40	-0,11	-7,24	-0,22	-13,61
TR_D2	1,36	1,73	1,64	0,28	20,84	-0,08	-4,86
cp=10							
Tot_s	148	318	235	87	58,78	-83	-26,10
Tot_S	278	442	360	82	29,50	-82	-18,55
$\overline{E(CT)}$	188,02 €	205,85 €	196,61 €	8,59	4,57	-9,25	-4,49
β^a	99,69	99,61	99,69	0,00	0,00	0,08	0,08
Nb_cmds	93	94	95	2,00	2,15	1,00	1,06
TR_D1	2,01	2,36	1,64	-0,37	-18,63	-0,73	-30,79
TR_D2	2,04	2,48	2,34	0,30	14,81	-0,14	-5,62

$\mu_i=40$, $ch=1$, $ct=10$, $K=100$

Tableau 4.11. Évaluation des performances dans les systèmes symétrique et asymétrique en délais d'approvisionnement pour $\sigma_i=10$

Les résultats de la simulation avec $\sigma_i=10$ sont rapportés dans le tableau 4.11. Nous tirons les enseignements suivants :

- Les seuils (Tot_s, Tot_S) du système S3 se situent entre ceux des systèmes S1 et S2.

- Le coût total moyen du système S3 se situe parfaitement au milieu de ceux des systèmes S1 et S2 tout en aboutissant au même taux de service.
- Le taux de transshipment chez le détaillant 2, dans le système S3, est supérieur à celui chez le détaillant 1. Alors que, dans les systèmes S1 et S2, les taux de transshipment chez les détaillants 1 et 2 sont proches. En effet, dans le système S3, afin d'honorer sa propre demande durant un long délai d'approvisionnement, le détaillant 2 tente de combler l'insuffisance de son stock disponible par le recours au transshipment auprès du détaillant 1 ayant un cycle d'approvisionnement plus court.
- Le déséquilibre en délai d'approvisionnement conduit aussi à augmenter le nombre de commandes dû à l'élévation du taux de transshipment.

Les résultats de la simulation avec $\sigma_i=20$ ont abouti aux mêmes conclusions. Nous n'avons pas jugé utile de les rapporter.

4.4 Conclusion

Vu que la modélisation analytique n'est pas possible à cause de la complexité du traitement des demandes perdues et de la prise en compte de la coopération entre détaillants, nous avons abordé la résolution de ce problème par simulation-optimisation à l'aide de l'outil Crystal Ball 7.2®.

L'évaluation des résultats met en relief les conditions sous lesquelles le transshipment apporte un gain et les situations où il fait défaut et identifie également les paramètres d'entrée qui influencent le bénéfice du transshipment, à savoir le coût de rupture, l'écart type et le délai d'approvisionnement.

Le chapitre suivant présente l'extension de ce travail en étudiant le problème de transshipment dans un système de distribution à deux échelons et détaillants multiples.

Chapitre 5 : Système à deux échelons et détaillants multiples, avec coût de transshipment fixe

-
- 5.1 Problème du transshipment dans un système de stock multi détaillants
 - 5.2 Les modèles d'optimisation
 - 5.2.1 Démarche retenue
 - 5.2.2 Analyse des résultats
 - 5.2.3 Impacts des paramètres d'entrée
 - 5.2.4 Impacts de la contrainte capacité du transshipment
 - 5.2.5 Complete pooling plafonné vs. complete pooling
 - 5.3 Réduction de la complexité du système de stock (R, s, S)
 - 5.3.1 Méthodes de résolution
 - 5.3.2 Évaluation des différentes politiques de stock
 - 5.4 Étude d'impacts des paramètres coûts et services
 - 5.4.1 Environnement d'expérimentation
 - 5.4.2 Effets des paramètres coûts
 - 5.4.3 Effet du taux de service
 - 5.5 Complete pooling vs. complete pooling conditionné
 - 5.6 Conclusion
-

5.1 Problème du transshipment dans un système de stock multi détaillants

Nous étendons, dans ce chapitre, le problème du transshipment étudié dans le chapitre précédent à plus de deux détaillants. La complexité de la résolution augmentant avec une tendance exponentielle avec le nombre de détaillants, nous avons dû nous en tenir aux hypothèses suivantes : les délais d'approvisionnement sont identiques pour tous les détaillants et le coût de transshipment est considéré constant au lieu d'être linéaire en fonction de la quantité de transshipment. Comme pour les travaux précédents, nous continuons à supposer que le centre de distribution ne détient pas de stock et ventile immédiatement tous les produits qui lui sont livrés.

La problématique de multi détaillants d'une part, et l'hypothèse du coût fixe pour le transshipment d'autre part, amènent à préciser les stratégies de réalisation du transshipment en cas de rupture :

- En effet, en cas de rupture chez un détaillant donné, il convient de préciser l'ordre selon lequel le transshipment va être sollicité auprès des autres détaillants. On peut penser à une stratégie qui consiste à s'adresser aux détaillants selon l'ordre décroissant de leur stock disponible (Burton et Banerjee 05). Nous avons opté d'explorer la stratégie selon un ordre fixe défini par un circuit unique. Par exemple, dans le cas d'un système à quatre détaillants ($N=4$), les détaillants sont numérotés dans le circuit 1, 2, 3 et 4. En cas de rupture chez le détaillant 1, il s'adressera en priorité au détaillant 2 pour combler le déficit du stock. Si le déficit ne peut pas être comblé en totalité, il s'adressera alors au détaillant 3 puis au détaillant 4. Selon cette même stratégie, une rupture chez le détaillant 2 amène à consulter en premier le détaillant 3 puis le détaillant 4 puis le détaillant 1, etc. Nous pensons que cette stratégie est acceptable dans le contexte où les détaillants sont proches les uns des autres. Elle a l'avantage de conduire à une simplification du modèle. Précisons que, quel que soit le nombre de détaillants qui seront consultés pour combler le déficit, le coût du transshipment sera le même.
- Il convient également de préciser la politique du transshipment à expérimenter. Nous avons opté d'étudier le comportement de trois variantes issues de la politique du complete pooling, à savoir :
 - le complete pooling *standard* : un détaillant sollicité par un transshipment accepte de mettre à disposition tout son stock disponible pour combler, partiellement ou totalement, le déficit restant à combler ;
 - le complete pooling *plafonné* : un détaillant sollicité par un transshipment accepte de combler le déficit selon ce que lui permet son stock disponible et à concurrence d'une quantité plafond définie ;
 - le complete pooling *conditionné* : un détaillant sollicité par un transshipment accepte de combler le déficit selon ce que lui permet son stock disponible et si une condition économique est satisfaite. Nous avons étudié le cas de la condition :

$$ct \leq (cp + ch) * X_{j,i,t} \text{ où}$$
 - ct =coût de transshipment (fixe et indépendant de la quantité)
 - cp = coût de rupture unitaire
 - ch = coût de possession unitaire

- $X_{j,i,t}$ = quantité de transshipment du détaillant j au détaillant i à la période t.

5.2 Formulation du problème

Nous adoptons les notations suivantes :

N Nombre des détaillants dans le système de distribution

$TX_{i,t}$ Quantité totale de transshipment reçue par le détaillant i, à la période t ;

$$TX_{i,t} = \sum_{j=1, j \neq i}^N X_{j,i,t}$$

$\eta_{i,t}$ Variable booléenne égale à 1 si le détaillant i a reçu un transshipment à la période t et 0 sinon

$\delta_{i,t}$ Variable booléenne égale à 1 si le détaillant i demeure en situation de rupture à la fin de la période t et 0 sinon

$QR_{i,t}$ Quantité de rupture chez le détaillant i à la période t

$QP_{i,t}$ Quantité de demande perdue chez le détaillant i à la période t

$$QP_{i,t} = QR_{i,t} - TX_{i,t} \quad (63)$$

$IP_{i,t}^b$ Position de stock chez le détaillant i au début de la période t

$IP_{i,t}^a$ Position de stock chez le détaillant i à la fin de la période t

$$IP_{i,t}^a = IP_{i,t}^b - \sum_{j=1, j \neq i}^N X_{i,j,t} \quad (64)$$

$IL_{i,t}^b$ Niveau de stock chez le détaillant i au début de la période t

$IL_{i,t}^a$ Niveau de stock chez le détaillant i à la fin de la période t

$$IL_{i,t}^a = IL_{i,t}^b - \sum_{j=1, j \neq i}^N X_{i,j,t} \quad (65)$$

Le coût total dans un système de stock multi détaillants avec un coût fixe de transshipment devient :

$$E(CT) = \left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^T \left(B_{i,t} K + E(IL_{i,t}^a) ch + E(QP_{i,t}) cp + \eta_{i,t} ct \right) \right) \right) \quad (66)$$

avec

$$B_{i,t} = \begin{cases} 1 & \text{si le détaillant i passe une commande à la période t (autrement dit,} \\ & \text{s'il a été constaté à la fin de la période que } IP_{i,t}^a \leq s_i) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

K=coût fixe de commande

Dans ce qui suit, nous allons commencer par étudier le comportement des politiques complete pooling standard et complete pooling plafonné dans un système de stock

(R, s, S) et ce, pour les cas de 2, puis 4, puis 8 détaillants. La complexité importante constatée avec l'augmentation du nombre de détaillants nous a amené à rechercher une politique de type (R, s, s+Q) qui donne des performances proches de celles obtenues pour (R, s, S) mais dont la complexité de résolution est plus réduite. Nous utilisons alors cette politique (R, s, s+Q) pour étudier le comportement de la politique complete pooling conditionné (pour les cas de 2, 4 et 8 détaillants) et comparer ses résultats avec ceux de la politique complete pooling standard. Enfin, nous étudions, pour un système de stock (R, s, s+Q), la sensibilité du transshipment aux différents paramètres coûts : commande, possession, rupture et transshipment et vis-à-vis du taux de service. Les expérimentations sont également faites pour la politique complete pooling standard et en considérant successivement les cas de 2, 4, 8 et 12 détaillants.

5.3 Système de stock (R, s, S) à détaillants multiples

5.3.1 Démarche retenue

Dans les modèles d'optimisation décrits ci-dessous, nous nous intéressons à déterminer, pour chaque détaillant i , la politique (s_i, S_i) qui minimise le coût total du système, étant donné que la période de révision R est fixée à une période.

Problème d'optimisation 1 : Complete pooling standard

$$\begin{aligned} & \underset{(s_i, S_i); i=1, \dots, N}{\text{Min}} E(CT) \\ \text{s.c. } & s_i \geq 0 : \text{entier positif ou nul}; i = 1, \dots, N \\ & S_i \geq 1 : \text{entier positif}; i = 1, \dots, N \end{aligned}$$

Problème d'optimisation 2 : Complete pooling plafonné

$$\begin{aligned} & \underset{(s_i, S_i); i=1, \dots, N}{\text{Min}} E(CT) \\ \text{s.c. } & s_i \geq 0 : \text{entier positif ou nul}; i = 1, \dots, N \\ & S_i \geq 1 : \text{entier positif}; i = 1, \dots, N \\ & X_{j,i,t} \leq Q_{\max}; i, j = 1, \dots, N; i \neq j; t = 1, \dots, T \end{aligned}$$

ou, plus précisément :

$$X_{j,i,t} = \begin{cases} \min\left(\left(d_{i,t} - IL_{i,t}^b\right)^+, Q_{\max}\right) & \text{si } d_{i,t} - IL_{i,t}^b \leq IL_{j,t}^b - d_{j,t} \\ \min\left(\left(IL_{j,t}^b - d_{j,t}\right)^+, Q_{\max}\right) & \text{sinon} \end{cases} \quad (67)$$

Nous résolvons ces modèles d'optimisation par la même procédure de recherche proposée en section 4.2.53. Les paramètres de gestion de stocks (s, S) obtenus dans un système de transshipment où $N=2$ seront utilisés comme des bornes supérieures pour le système de transshipment où $N=4$. De même, les paramètres de gestion obtenus pour un système à $N=4$ seront utilisés comme des bornes supérieures pour le système à $N=8$. Ceci est justifié par le théorème de gestion de stocks donnant la

formule de calcul de s pour un système à N détaillants identiques (Pimor 03). Ces formules sont rappelées dans le tableau 5.1.

N	s pour un détaillant
2	$\mu_i(L_i+1) + \frac{\sqrt{2}}{2} * k * \sigma_i \sqrt{L_i+1}$
4	$\mu_i(L_i+1) + \frac{\sqrt{4}}{4} * k * \sigma_i \sqrt{L_i+1}$
8	$\mu_i(L_i+1) + \frac{\sqrt{8}}{8} * k * \sigma_i \sqrt{L_i+1}$

Tableau 5.1. Détermination du point de commande d'un détaillant dans un réseau de distribution composé de N détaillants

5.3.2 Analyse des résultats

Les expérimentations sont évaluées pour les valeurs des paramètres d'entrée : $\mu_i=40$, $K=100$, $ch=1$, $cp=100$, $ct=20$, $T=100$ et en considérant, pour les paramètres N , L_i , σ_i et Q_{\max} les combinaisons des valeurs données dans le tableau 5.2.

Paramètres	Valeurs
N	2 ; 4 ; 8
L_i	1 ; 3
σ_i	10 ; 20
Q_{\max}	5 ; 10 ; 15 ; 30

Tableau 5.2. Valeurs considérées pour les paramètres N , L_i , σ_i et Q_{\max} (pooling standard et pooling plafonné)

Nous relevons, comme mesures de performances, les valeurs moyennes suivantes :

Coût total moyen d'un détaillant :

$$\overline{E(CT)} = E(CT)/N \quad (68)$$

Point de commande moyen d'un détaillant :

$$\bar{s} = \sum_{i=1}^N s_i / N \quad (69)$$

Niveau de reapprovisionnement moyen d'un détaillant :

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^N S_i / N \quad (70)$$

5.3.21 Impacts des paramètres d'entrée (N , L_i , σ_i) sur la politique complete pooling standard

5.3.211 Impacts du paramètre N

Le tableau 5.3 présente les résultats de la simulation du comportement de la politique complete pooling standard, effectués pour $N=2$, 4 et 8. Une synthèse en pourcentages est extraite dans le tableau 5.4 pour ce qui concerne la sensibilité au nombre de détaillants.

Exemples		\bar{s}	\bar{S}	$\overline{E(CT)}$	β^a	%TR
σ_i	L_i	N=2				
10	1	80	142,5	9 595,21 €	99,89	2,28
10	3	164,5	230,5	10 505,33 €	99,84	2,89
20	1	93,5	175	11 293,74 €	99,79	3,85
20	3	185,5	271	13 149,26 €	99,68	5,02
		N=4				
10	1	63,5	138,75	8 279,99 €	99,89	7,42
10	3	146	222	9 067,20 €	99,86	9,46
20	1	73	156	9 282,27 €	99,85	7,88
20	3	163	251,75	10 716,72 €	99,8	8,67
		N=8				
10	1	57	111	7 229,84 €	99,93	21,01
10	3	134	208	8 062,84 €	99,93	24,84
20	1	55	137	7 964,06 €	99,88	15,92
20	3	154,875	231,125	9 070,60 €	99,87	23,49

$\mu_i=40$, $K=100$, $ch=1$, $cp=100$, $ct=20$

Tableau 5.3. Résultats de la simulation pour le complete pooling standard

L'allure des courbes est donnée en figure 5.1. L'analyse de l'ensemble conduit aux constats suivants :

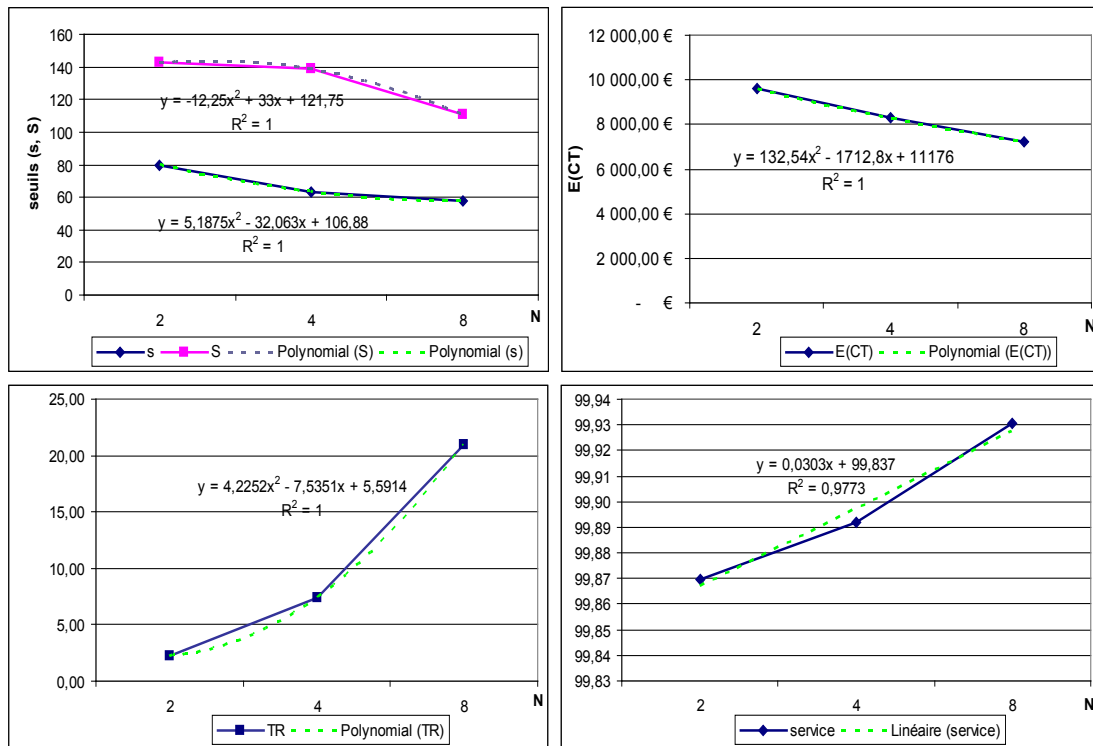
- Les seuils (s , S) diminuent avec l'augmentation du nombre de détaillants. Cette diminution est approchée par une allure polynomiale décroissante avec certains coefficients négatifs ;
- Le coût total moyen ($\overline{E(CT)}$) suit aussi une allure polynomiale décroissante en fonction de l'augmentation du nombre de détaillants ;
- Le taux du transshipment (TR) croît selon une allure polynomiale croissante en fonction de l'augmentation du nombre de détaillants.

Ces constats justifient l'intérêt de la mise en œuvre du complete pooling standard au sein des grands systèmes de distribution.

%Diff	s↓	S↓	$\overline{E(CT)} \downarrow$	$\beta^{a\uparrow}$	TR↑
Exemples	Sensibilité au passage de N=2 à N=4				
$\sigma_i=10, L_i=1$	-20,63	-2,63	-13,71	0,02	225,31
$\sigma_i=10, L_i=3$	-11,09	-3,80	-13,69	0,01	227,02
$\sigma_i=20, L_i=1$	-21,93	-11,14	-19,01	0,03	124,03
$\sigma_i=20, L_i=3$	-12,13	-7,10	-18,50	0,13	72,54
	Sensibilité au passage de N=4 à N=8				
$\sigma_i=10, L_i=1$	-9,65	-20,36	-12,68	0,04	183,12
$\sigma_i=10, L_i=3$	-8,29	-6,03	-11,08	0,07	162,52
$\sigma_i=20, L_i=1$	-19,86	-11,98	-14,20	0,03	101,99
$\sigma_i=20, L_i=3$	-4,98	-8,19	-15,36	0,06	170,99

$\mu_i=40, K=100, ch=1, cp=100, ct=20$

Tableau 5.4. Variation des performances en fonction du nombre des détaillants



$\mu_i=40, K=100, ch=1, cp=100, ct=20$

Figure 5.1. Variation des performances en fonction du nombre des détaillants, cas où $\sigma_i=10, L_i=1$

Sur les courbes de la figure 5.1, R^2 représente le coefficient de détermination et indique le degré de correspondance entre les valeurs estimées pour la tendance et les données réelles des tests. Plus ce coefficient se rapproche de 1, plus la courbe de tendance est fiable.

5.3.212 Impacts du paramètre L_i

Durant un long délai d’approvisionnement, chaque détaillant tente de préserver assez de stocks pour faire face aux éventuelles ruptures, ce qui explique l’élévation des seuils de stock (s, S). Dans un système sans transshipment, le point de commande

augmente avec une allure linéaire forte définie par $s = \mu_i (L_i + 1) + k * \sigma_i \sqrt{L_i + 1}$. Les résultats constatés par la simulation montrent que ce n'est pas le cas pour le transshipment avec complete pooling standard (cf. Tableau 5.5).

Ces résultats expliquent, en fait, que l'augmentation du point de commande a été compensée par l'effet du complete pooling dont le taux s'élève linéairement avec L_i . Cet effet, conduit évidemment à une hausse en coût total moyen ($\overline{E(CT)}$).

%Diff Exemples	s↑	S↑	$\overline{E(CT)}$ ↑	β^a ↓	TR↑
	N=2				
$\sigma_i=10, L_i=1 \rightarrow 3$	105,63	61,75	9,49	-0,02	26,82
$\sigma_i=20, L_i=1 \rightarrow 3$	98,40	54,86	14,73	-0,15	42,76
N=4					
$\sigma_i=10, L_i=1 \rightarrow 3$	130,31	59,82	9,51	-0,04	27,49
$\sigma_i=20, L_i=1 \rightarrow 3$	123,29	61,90	15,45	-0,04	9,95
N=8					
$\sigma_i=10, L_i=1 \rightarrow 3$	133,77	88,57	11,52	0,00	18,21
$\sigma_i=20, L_i=1 \rightarrow 3$	164,74	68,86	13,89	-0,01	47,51

$\mu_i=40, K=100, ch=1, cp=100, ct=20$

Tableau 5.5. Sensibilité des performances à la variation du délai d'approvisionnement

5.3.213 Impacts du paramètre σ_i

La même expression du point de commande (s), rappelée ci-dessus, montre que, pour un délai L_i fixé, l'augmentation de s suit une allure linéaire en fonction de σ_i . Nous obtenons approximativement le même comportement pour les seuils de stock (s, S) et pour le coût total moyen ($\overline{E(CT)}$) avec le complete pooling standard. Toutefois, le taux du transshipment croît selon une allure polynomiale en fonction de σ_i (cf. Tableau 5.6). Ceci peut s'expliquer par l'effet du comportement aléatoire des demandes clients sur le système de transshipment.

%Diff Exemples	s↑	S↑	$\overline{E(CT)}$ ↑	β^a ↓	TR↑↓
	N=2				
$L_i=1, \sigma_i=10 \rightarrow 20$	16,88	22,81	19,44	-0,05	54,24
$L_i=3, \sigma_i=10 \rightarrow 20$	12,77	17,57	25,17	-0,17	73,62
N=4					
$L_i=1, \sigma_i=10 \rightarrow 20$	14,96	12,07	12,10	-0,05	6,22
$L_i=3, \sigma_i=10 \rightarrow 20$	11,45	13,53	18,19	-0,05	-8,39
N=8					
$L_i=1, \sigma_i=10 \rightarrow 20$	1,96	23,87	10,16	-0,05	-24,22
$L_i=3, \sigma_i=10 \rightarrow 20$	15,47	10,92	12,50	-0,06	-5,44

$\mu_i=40, K=100, ch=1, cp=100, ct=20$

Tableau 5.6. Sensibilité des performances à la variation de l'écart type

5.3.2 Impacts de la contrainte capacité du transshipment (Q_{max})

Pour étudier l’effet de la politique complete pooling plafonné sur les performances du système, nous considérons quatre valeurs différentes de capacité du transshipment : $Q_{max}= 5, 10, 15$ et 30 . Ces valeurs représentent respectivement 12.5%, 25%, 37.5% et 75% de la demande moyenne par période ($\mu_i=40$) chez chacun des détaillants. L’analyse de sensibilité des performances à la variation de ce ratio $\%(Q_{max} / \mu_i)$ se résume comme suit (cf. Figures 5.2-5.4) :

- Plus le ratio Q_{max} / μ_i est élevé plus le coût total moyen $\overline{E(CT)}$ et les seuils de stocks moyens (\bar{s}, \bar{S}) décroissent alors que le taux de transshipment augmente. Cette réduction en coût et stocks se décline davantage avec l’augmentation du nombre de détaillants (N) alors que l’accroissement du taux de transshipment s’accroît avec N.
- Une réduction de la capacité de transshipment diminue le transshipment sortant pour les détaillants ayant des stocks disponibles, et par conséquent, chaque détaillant prend des précautions pour réduire les éventuelles ruptures en réservant plus de stocks, ce qui est justifié par des niveaux élevés de stocks chez chaque détaillant (\bar{s}, \bar{S}). Ceci entraîne une augmentation du coût total.
- Le taux de service du système β^a s’améliore légèrement avec l’augmentation du nombre de détaillants. Néanmoins, son allure est presque constante (cf. Tableau 5.7).

Ces comportements de performances ont été constatés pour toutes les valeurs testées de σ_i et de L_i .

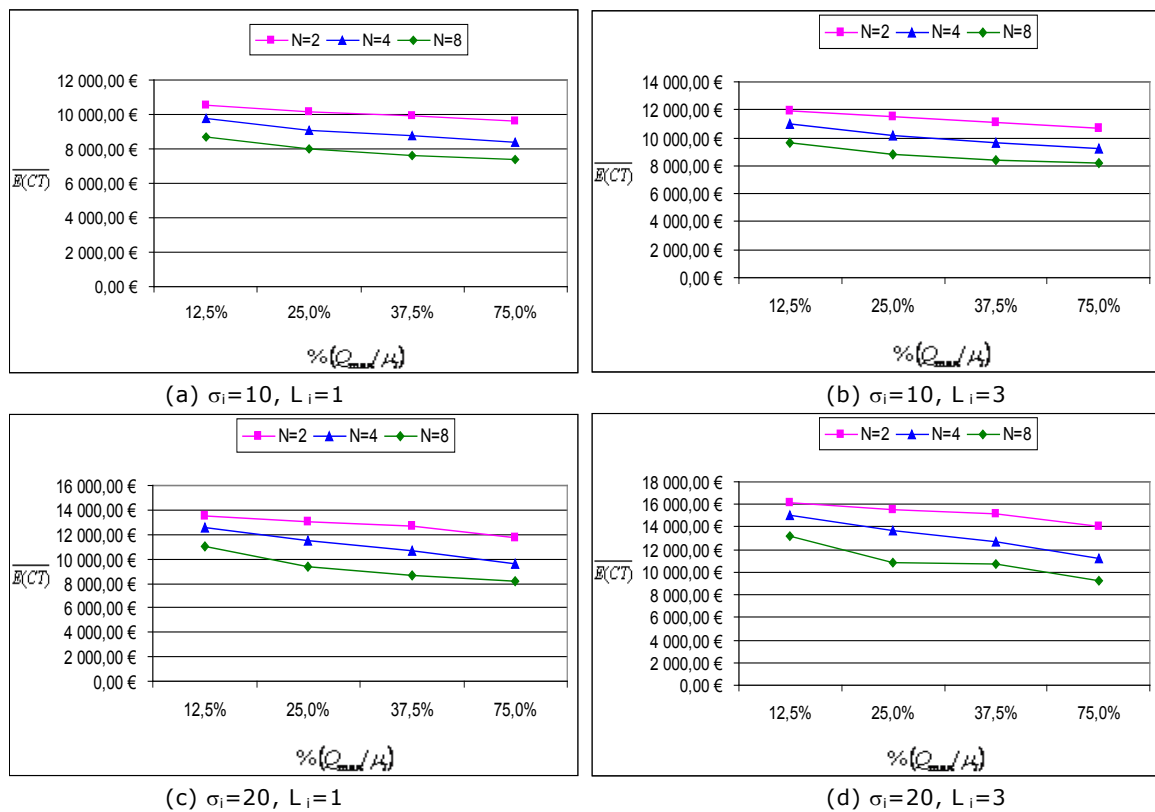
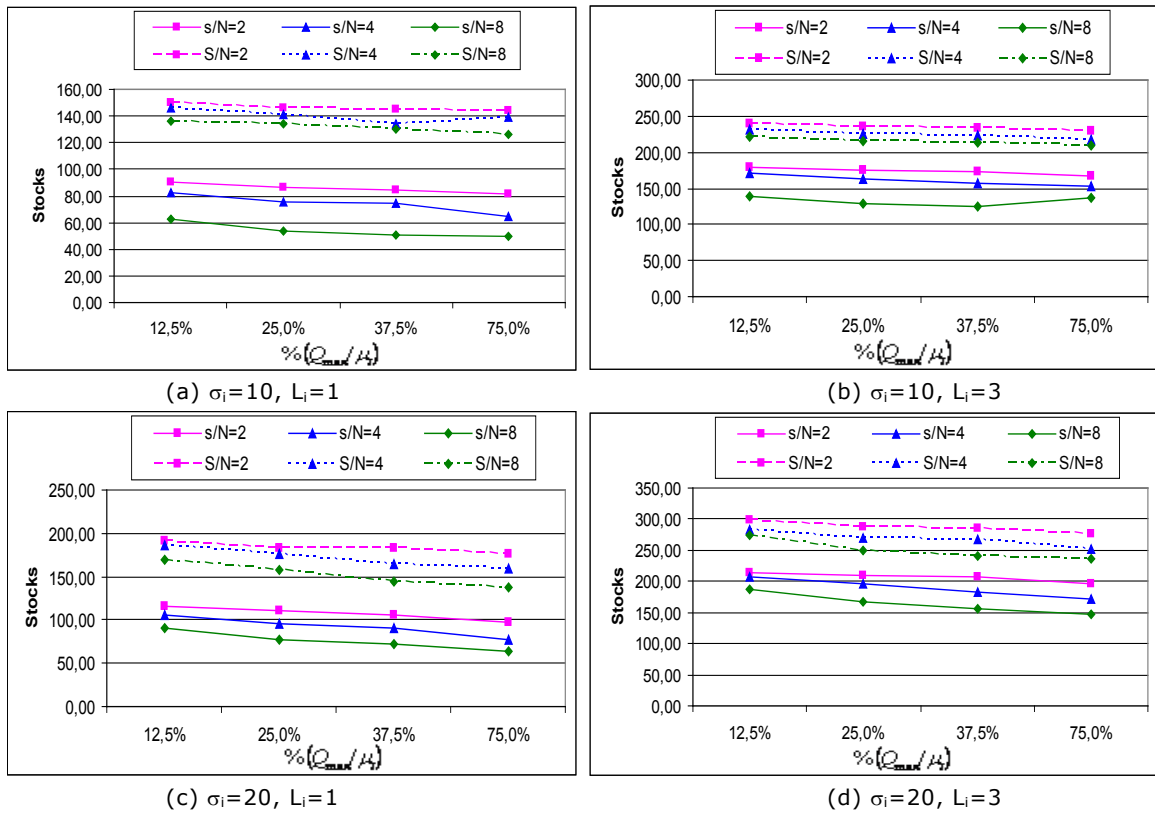
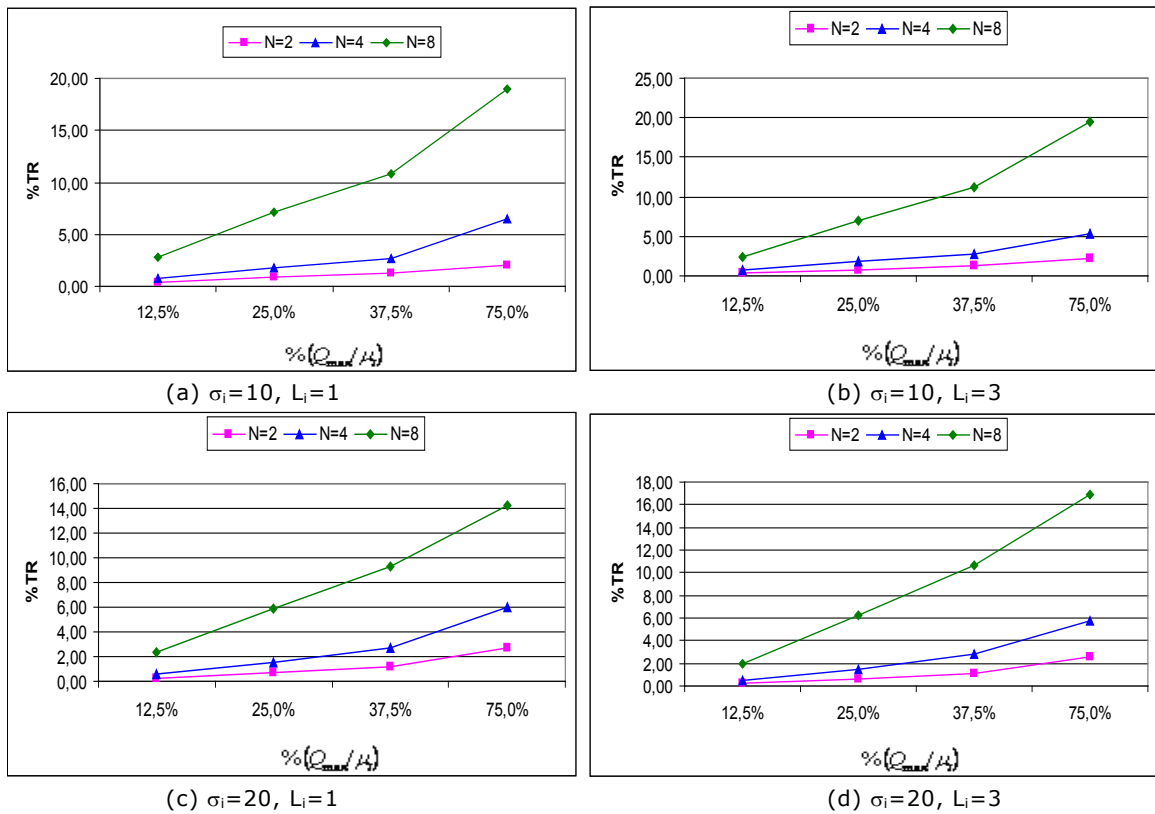


Figure 5.2. Sensibilité du coût total à la capacité du transshipment Q_{max} pour le complete pooling plafonné



Note : s, S représentent \bar{s}, \bar{S}

Figure 5.3. Sensibilité des paramètres de stocks à la capacité du transshipment Q_{max} pour le complete pooling plafonné



$\mu_i=40, K=100, ch=1, cp=100, ct=20$

Figure 5.4. Sensibilité du taux de transshipment à la capacité du transshipment Q_{max} pour le complete pooling plafonné

5.3.23 Complete pooling plafonné vs. complete pooling standard

Nous voulons comparer, pour un taux de service donné, le complete pooling plafonné au regard du complete pooling standard. L'idée est de fixer une valeur du taux de service et de chercher, pour différentes combinaisons des valeurs N , σ_i et L_i , la valeur du Q_{\max} dans le complete pooling plafonné qui permet de réaliser ce taux de service. Nous comparons alors les seuils et coût total moyen correspondant dans le complete pooling plafonné à ceux du complete pooling standard donnant le même taux de service. Il s'avère que, quasiment pour toutes les simulations effectuées, le complete pooling plafonné est plus exigeant en seuils de stocks et coût total moyen et ce, sans aucune compensation particulière. Par exemple, pour le cas où $\sigma_i=10$, $L_i=1$, nous avons les résultats suivants (cf. Tableaux 5.7 et 5.8) :

- Pour $N=2$, le complete pooling plafonné avec $Q_{\max}=10$ unités aboutit à un taux de service 99.86% qui est proche de celui du complete pooling standard 99.87% mais avec une hausse en seuils de stocks (7.5% pour s , 2.73% pour S) et en coût total moyen (5.6%) ;
- Pour $N=4$, le complete pooling plafonné avec $Q_{\max}=5$ unités aboutit au même service 99,89% que celui du complete pooling standard avec également une augmentation des seuils de stocks (23.26% pour s , 4.97% pour S) et du coût total moyen (15.15%) ;
- Pour $N=8$, le complete pooling plafonné avec $Q_{\max}=5$ unités aboutit au même service 99,93% que celui du complete pooling standard avec une augmentation des seuils de stocks (8.57% pour s , 19.05% pour S) et du coût total moyen (17.11%).

Ces conclusions se confirment avec les cas où $\sigma_i=10$, $L_i=3$ et $\sigma_i=20$, $L_i=1$.

			Complete pooling plafonné				Complete pooling standard
			% (Q_{\max}/μ_i)				
N	σ_i	L_i	12.5%	25%	37.5%	75%	
2	10	1	99,85	99,86	99,88	99,89	99,87
	10	3	99,80	99,81	99,84	99,85	99,84
	20	1	99,73	99,73	99,74	99,75	99,79
	20	3	99,62	99,63	99,65	99,68	99,68
4	10	1	99,89	99,92	99,93	99,89	99,89
	10	3	99,84	99,88	99,89	99,90	99,85
	20	1	99,75	99,80	99,84	99,84	99,85
	20	3	99,66	99,73	99,72	99,82	99,81
8	10	1	99,93	99,93	99,94	99,92	99,93
	10	3	99,91	99,91	99,92	99,92	99,93
	20	1	99,78	99,89	99,91	99,91	99,88
	20	3	99,71	99,81	99,83	99,85	99,87

$\mu_i=40$, $K=100$, $ch=1$, $cp=100$, $ct=20$

Tableau 5.7. Résultats du taux de service global pour les politiques du complete pooling standard et du complete pooling plafonné

Un autre constat intéressant que l'on peut tirer de ces tableaux est que l'augmentation du nombre des détaillants fait baisser (jusqu'à une certaine limite) l'exigence en Q_{\max} pour le même taux de service, mais toujours avec un avantage au complete pooling standard pour ce qui concerne les seuils et les coûts (pour l'exemple avec $\sigma_i=10$, $L_i=1$ $Q_{\max}=10$ pour $N=2$ et $Q_{\max}=5$ pour $N=4$ et 8). Les deux politiques tendent à avoir les mêmes performances quand les écarts types et les délais augmentent (voir résultats pour $\sigma_i=20$, $L_i=3$). Il convient de souligner que dans ces cas, le Q_{\max} exigé atteint le ratio 75% de la demande.

%Diff	$\sigma_i=10, L_i=1$			$\sigma_i=10, L_i=3$			$\sigma_i=20, L_i=1$			$\sigma_i=20, L_i=3$		
	N=2	N=4	N=8	N=2	N=4	N=8	N=2	N=4	N=8	N=2	N=4	N=8
	$Q_{\max}=30$			$Q_{\max}=30$			$Q_{\max}=30$			$Q_{\max}=30$		
\bar{s}	1,23	1,55	-15,04	1,79	3,94	1,74	4,1	5,5	12,82	5,36	4,68	-5,9
\bar{S}	1,04	0,36	12,39	-0,22	-1,6	0,95	1,13	2,05	0,27	2,17	0,4	1,96
$\overline{E(CT)}$	0,17	1,22	1,89	1,38	1,66	1,37	4,22	3,83	2,46	6,32	4,02	2,48
	$Q_{\max}=15$			$Q_{\max}=15$			$Q_{\max}=15$			$Q_{\max}=15$		
\bar{s}	4,76	15,33	0,86	4,64	7,29	5,38	12,21	19,34	4,54	10,17	10,68	0,24
\bar{S}	2,06	-3,74	14,92	1,07	0,56	1,94	4,63	5,9	-5,39	4,91	5,98	3,9
$\overline{E(CT)}$	3,01	5,65	6,37	5,57	6,29	4,04	10,78	12,74	7,89	13,04	15,38	15,54
	$Q_{\max}=10$			$Q_{\max}=10$			$Q_{\max}=10$			$Q_{\max}=10$		
\bar{s}	7,51	15,89	-6,5	6,27	10	-4,17	15,77	24,16	28,25	11,88	16,94	7,26
\bar{S}	2,73	1,94	17,38	1,91	1,99	3,08	4,37	11,77	12,89	5,90	6,50	7,73
$\overline{E(CT)}$	5,61	8,84	9,72	8,43	10,45	8,29	13,58	18,9	15,34	15,67	21,77	16,63
	$Q_{\max}=5$			$Q_{\max}=5$			$Q_{\max}=5$			$Q_{\max}=5$		
\bar{s}	11,6	23,26	8,57	8,1	14,47	3,68	18,7	31,13	39,12	13,52	21,35	17,56
\bar{S}	5,32	4,97	19,05	4,16	4,52	6,03	8,62	16,29	19,54	9,52	11,04	15,65
$\overline{E(CT)}$	9,02	15,15	17,11	11,77	17,41	16,74	16,41	26,28	27,65	18,46	28,99	31,44

$\mu_i=40, K=100, ch=1, cp=100, ct=20$

Tableau 5.8. Différence en performances entre les comportements du complete pooling standard et le complete pooling plafonné

Sur un autre plan, il nous faut noter que, dans la phase où la simulation-optimisation évolue avec un pas de discrétisation égal à 1, le nombre de combinaisons possibles de s et S augmente considérablement avec le nombre de détaillants. Plus précisément, le nombre de combinaisons possibles de s et S pour un seul détaillant est de 121. Pour deux détaillants, ce nombre passe à $121^2 \approx 10^4$. Pour quatre détaillants, il est de $121^4 \approx 10^8$ et, pour huit détaillants, il est de $121^8 \approx 10^{16}$, etc. Cette complexité, de tendance exponentielle ($\approx e^{5N}$), induit un temps d'exécution très long. Ceci nous a incité à chercher d'autres méthodes de résolution permettant de calculer le niveau de recomplètement S avec un compromis acceptable entre la qualité de la solution et la complexité. Notre choix a porté sur la recherche d'une politique de stock équivalente de type $(R, s, s+Q)$.

5.4 Vers une résolution par une politique de stock de type (R, s, s+Q)

5.4.1 Choix d'approximation de la quantité Q

Deux choix se sont présentés à nous pour l'approximation de la quantité Q.

Approximation par la quantité EOQ de Wilson

La quantité économique de commande EOQ de Wilson (Wilson 34) est très utilisée dans la littérature en raison de sa simplicité. Il est montré, dans (Wagner et al. 65 ; Veinott et Wagner 65), que l'EOQ est une bonne approximation pour $(S_i - s_i)$ si le rapport K/ch (coût de commande/coût de possession) est relativement élevé par rapport à μ_i (demande moyenne par période), ce qui est le cas dans notre étude.

$$EOQ = \sqrt{\frac{2K\mu_i}{ch}} \quad (71)$$

Nous pouvons l'adopter dans la procédure de simulation-optimisation utilisée jusqu'à ici mais en considérant une seule variable de décision qui est le point de commande s_i pour chaque détaillant i . Ainsi, le niveau de reapprovisionnement S_i sera obtenu en ajoutant la quantité EOQ à s_i et la quantité d'approvisionnement $Q_{i,t}$ sera déterminée de façon à ramener le stock à ce niveau. La complexité de la résolution selon cette politique sera réduite de 50% par rapport à celle de la politique (R, s, S).

Approximation par la quantité Q_p de Ehrhardt et Mosier

Nous avons mentionné, dans le chapitre 2 (§2.4), que Ehrhardt et Mosier (Ehrhardt et Mosier 84) ont proposé une quantité de commande Q_p considérée comme étant une bonne approximation de la quantité optimale de commande en raison de son indépendance du coût de rupture et du taux de service.

$$Q_p = 1.30 \mu_i^{0.494} (K/ch)^{0.506} \left(1 + \sigma_{L_i+1}^2 / \mu_i^2\right)^{0.116} \quad (72)$$

$$\text{avec } \sigma_{L_i+1} = \sigma_i \sqrt{L_i + 1}$$

Nous pouvons également l'utiliser dans la même procédure de recherche pour déterminer le point de commande s_i . Dans ce cas, le niveau de reapprovisionnement S_i sera égal à $s_i + Q_p$ et la quantité d'approvisionnement $Q_{i,t}$ sera déterminée de façon à ramener le stock à ce niveau. La complexité de la résolution par la politique (R, s, s+ Q_p) au regard de celle de la politique (R, s, S) sera aussi réduite de 50%.

5.4.2 Évaluation des différentes politiques de stock

Pour comparer entre elles les trois politiques (R, s, S), (R, s, s+EOQ) et (R, s, s+ Q_p), nous les avons appliquées à quatre exemples de systèmes de stock à un seul détaillant, avec les données $ch=1$, $ct=20$, $cp=100$, $K=100$, $T=100$ et $R=1$; les quatre exemples correspondant aux combinaisons $(L_i, \sigma_i) = (1, 10)$, $(3, 10)$, $(1, 20)$, $(3, 20)$. Pour les valeurs d'entrée considérées, nous obtenons $EOQ=89$. Le calcul de Q_p , pour les quatre combinaisons, donne respectivement 84, 85, 87 et 90.

Les résultats de la simulation sont rapportés dans le tableau 5.9. Nous remarquons que la valeur obtenue pour s est très approximativement la même pour les trois politiques tandis que la valeur obtenue pour S selon la politique (R, s, S) est inférieure aux quantités calculées par les politiques $(R, s, s+EOQ)$ et $(R, s, s+Q_p)$. Nous relevons aussi que la politique $(R, s, s+Q_p)$ est meilleure pour les trois premiers exemples alors que la politique $(R, s, s+EOQ)$ est meilleure pour le quatrième exemple, ce qui s'explique simplement par le fait que les formules de calcul donnent une valeur Q_p inférieure à celle de l'EOQ pour les trois premiers exemples et inversement pour le quatrième exemple. Dans tous les cas, les écarts entre les valeurs de S obtenues par la politique (R, s, S) par rapport à celles obtenues par les politiques $(R, s, s+EOQ)$ et $(R, s, s+Q_p)$ ont tendance à se réduire avec l'augmentation du délai d'approvisionnement L_i et notamment de l'écart type de la demande σ_i .

Tous ces constats nous ont suggéré d'approcher la politique (R, s, S) par une politique $(R, s, s+Q)$ avec Q égal au minimum des valeurs EOQ et Q_p calculées avec les données d'entrée du modèle de stock considéré.

		(R, s, S)		$(R, s, s+EOQ)$		$(R, s, s+Q_p)$	
L_i	σ_i	s	S	s	S	s	S
1	10	95	155	95	184	96	180
3	10	184	244	184	273	184	269
1	20	119	195	119	208	119	206
3	20	219	303	219	308	220	310

$\mu_i=40, K=100, ch=1, cp=100, ct=20$

Tableau 5.9. Évaluation des performances des politiques (R, s, S) , $(R, s, s+EOQ)$ et $(R, s, s+Q_p)$ dans un système de stock sans transshipment

Pour plus d'assurance, nous avons appliqué, chacune des trois politiques, pour 12 nouveaux exemples correspondant à des systèmes de stock à 2, 4 et 8 détaillants avec transshipment. Nous avons maintenu les mêmes valeurs pour les données d'entrée et testé, pour chacun des systèmes de stock à 2, 4 et 8 détaillants, les mêmes combinaisons pour (L_i, σ_i) . Les résultats de la simulation sont rapportés dans le tableau 5.10. Ils confirment les mêmes constats que pour les systèmes de stock sans transshipment.

En conséquence, nous avons retenu d'utiliser la politique $(R, s, s+\min(EOQ, Q_p))$ pour les simulations qui suivent et qui visent à étudier l'impact des différents coûts (commande, possession, rupture et transshipment) et des exigences en taux de service sur les performances des systèmes de stock.

	(R, s, S)			(R, s, s+EOQ)			(R, s, s+Q _p)		
	N=2	N=4	N=8	N=2	N=4	N=8	N=2	N=4	N=8
L_i=1, σ_i=10									
$\overline{E(CT)}$	9 595,21 €	8 279,99 €	7 240,67 €	9 685,90 €	8 425,77 €	7 647,55 €	9 678,61 €	8 348,46 €	7 414,29 €
\overline{s}	80	63,5	48,375	79,5	63,5	50,5	80	62,5	47,625
\overline{S}	144,5	138,75	126,625	168,5	152,5	139,5	164	146,5	131,625
%TR	2,37	7,42	20,64	2,45	7,08	16,41	2,58	8,00	19,83
L_i=3, σ_i=10									
$\overline{E(CT)}$	10 505,33 €	9 067,20 €	7 949,35 €	10 651,24 €	9 234,60 €	8 364,73 €	10 629,59 €	9 151,05 €	8 239,50 €
\overline{s}	164,5	146,25	133,75	164	149,25	132,125	164,5	148,5	131,125
\overline{S}	230,5	221,75	215,5	253	238,25	221,125	249,5	233,5	216,125
%TR	2,89	9,46	24,86	3,45	7,13	25,12	3,48	7,85	26,92
L_i=1, σ_i=20									
$\overline{E(CT)}$	11 293,74 €	9 283,61 €	7 991,24 €	11 320,28 €	9 286,02 €	7 949,93 €	11 303,31 €	9 295,20 €	7 939,14 €
\overline{s}	93,5	72,5	56,625	91	71	55,125	92	72	54,75
\overline{S}	175	161	148,125	180	160	144,125	179	159	141,75
%TR	3,85	7,56	17,43	4,35	8,23	17,33	4,08	7,86	17,92
L_i=3, σ_i=20									
$\overline{E(CT)}$	13 149,26 €	10 716,72 €	9 134,59 €	13 151,87 €	10 691,05 €	9 146,37 €	13 145,50 €	10 721,47 €	9 120,54 €
\overline{s}	185,5	163	142,75	188	163,5	142,75	188	165,25	144,875
\overline{S}	271	251,75	233,875	277	252,5	231,75	278	255,25	234,875
%TR	5,02	8,67	23,49	23,49	8,52	21,35	4,37	7,82	19,60

$\mu_i=40$, $ch=1$, $ct=20$, $cp=100$, $K=100$, $T=100$ et $R=1$

Tableau 5.10. Évaluation des performances des politiques (R, s, S), (R, s, s+EOQ) et (R, s, s+Q_p) dans des systèmes de stock à 2, 4 et 8 détaillants avec transshipment

5.5 Étude de l'impact des paramètres coûts

5.5.1 Contexte d'expérimentation

Dans cette partie, nous fixons les paramètres de la demande (μ_i , σ_i) et le délai d'approvisionnement (L_i) et nous faisons varier tour à tour les valeurs des paramètres coûts (K , ch , cp et ct). Nous considérons les données d'entrée suivantes : $\mu_i=40$, $\sigma_i=10$, $L_i=1$ (pour $i=1, \dots, N$) et $T=52$. Nous avons réduit l'horizon de planification T de 100 à 52 périodes pour des raisons de limitations du logiciel Crystal Ball® (nombre maximum de variables aléatoires égal à 1000). Les valeurs considérées pour le nombre de détaillants et les paramètres coûts sont données dans le tableau 5.11. Les combinaisons de ces valeurs conduisent à 144 problèmes.

Paramètres	Désignation	Valeurs
N	Nombre de détaillants	2; 4; 8 ; 12
K	Coût de commande	100; 500; 1000
cp	Coût de rupture	10; 100; 500
ch	Coût de possession	1; 10
ct	Coût de transshipment	20; 100

Tableau 5.11. Valeurs considérées dans l'étude de l'impact des paramètres coûts

Nous considérons comme mesure de performance le coût total moyen ramené à l'échelle d'une unité vendue par détaillant. Notre objectif est donc de déterminer, dans un système de stock fonctionnant selon une politique (R, s_i, s_i+Q_p) avec complete pooling standard, le point de commande s_i minimisant le coût total moyen que nous ramenons à l'échelle d'une unité vendue par détaillant :

$$\overline{E(CT)}' = E(CT) / \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (d_{i,t} - QP_{i,t}) \quad (73)$$

Le problème d'optimisation peut alors s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned} & \underset{s_i; i=1, \dots, N}{\text{Min}} \overline{E(CT)}' \\ & \text{avec } E(CT) = \left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^T (B_{i,t} K + E(IL_{i,t}^a) ch + E(QP_{i,t}) cp + \eta_{i,t} ct) \right) \right) \end{aligned}$$

s.c. $s_i \geq 0$: entier positif ou nul; $i = 1, \dots, N$

Les résultats de simulation, dans tous les cas considérés, sont rapportés dans le tableau 5.12. Le niveau de reapprovisionnement est évalué par $\bar{S} = \bar{s} + Q_p$.

5.5.2 Analyse des résultats

Pour des paramètres ch , cp et ct fixés, les résultats obtenus confirment les résultats analytiques établis dans le chapitre 4 (§4.1.4), à savoir que l'augmentation du coût de commande conduit à avoir un point de commande plus faible et un niveau de reapprovisionnement plus important. D'où une hausse en coût total moyen par unité vendue.

De façon plus détaillée, nous relevons les constats suivants :

- Plus le coût de commande K augmente, plus les seuils s_i ainsi que le taux de transshipment diminuent tandis que le coût total moyen augmente. Ceci s'explique par le fait que l'augmentation de K entraîne l'augmentation de la quantité de commande Q_p . Par suite, la minimisation du coût total conduit à abaisser le seuil s en comptant $S=s+Q_p$. Il en résulte une disponibilité de stocks qui réduit le besoin de recours aux transshipments en même temps qu'elle augmente le coût total.
- Plus le coût de rupture cp augmente (avec K , ch et ct fixes), plus il y a besoin de stock de sécurité. Q_p restant constant, c'est l'intervalle $[\bar{s}, \bar{S}]$ qui se déplace vers le haut. Pour les mêmes raisons que précédemment (mais avec un impact plus modéré), le taux de transshipment diminue tandis que le coût total augmente.
- L'augmentation du coût de possession fait abaisser (par calcul) la quantité de commande Q_p . Il en résulte une augmentation de la fréquence des commandes et, par conséquent, une augmentation sensible du coût total et un recours plus important aux transshipments. L'augmentation de K accentue ces deux phénomènes. A souligner, toutefois, que, pour un rapport K/ch donnant une

valeur Q_p faible, l'augmentation de la fréquence de la commande devient si importante qu'elle rend plus rare le recours au transshipment.

- D'une façon générale, l'augmentation du nombre de détaillants N , pour K constant (et, donc, pour Q_p constant), conduit à maintenir la longueur de l'intervalle $[\bar{s}, \bar{S}]$ mais en le ramenant vers le bas. Cet abaissement du seuil \bar{s} a un impact à la fois sur la réduction du coût total et sur l'augmentation du taux de transshipment.

		\bar{s}	\bar{S}	$\overline{E(CT)'$	β^a	%TR	Nb_cds	\bar{s}	\bar{S}	$\overline{E(CT)'$	β^a	%TR	Nb_cds	\bar{s}	\bar{S}	$\overline{E(CT)'$	β^a	%TR	Nb_cds
		K=100						K=500						K=1000					
ch	cp	N=2																	
1	10	60	144	2,13 €	98,38	16,49	18,86	39	228	4,61 €	97,72	15,09	9,31	30,50	297,50	6,54 €	97,60	13,54	6,72
1	100	78,5	162,5	2,45 €	99,85	3,22	19,15	69	258	4,99 €	99,82	3,05	9,48	68	335	6,96 €	99,86	2,80	6,83
1	500	88	172	2,63 €	99,98	0,86	19,56	81,5	270,5	5,20 €	99,98	0,86	9,54	73	340	7,27 €	99,93	2,34	6,84
10	100	69	95	7,54 €	98,83	5,20	48,63	65,5	124,5	14,86 €	98,53	11,06	24,93	61,5	145,5	20,64 €	98,54	11,49	18,96
10	500	78	104	9,35 €	99,79	2,24	48,50	76,5	135,5	17,09 €	99,69	4,56	25,26	74	158	23,17 €	99,69	4,28	19,38
		N=4																	
1	10	40	124	1,84 €	98,53	23,30	18,17	32	221	4,40 €	99,08	13,16	9,47	23	290	6,33 €	98,97	11,42	6,86
1	100	58,75	142,75	2,17 €	99,75	10,16	18,75	52,75	241,75	4,65 €	99,87	5,79	9,43	50	317	6,61 €	99,88	4,68	6,78
1	500	70	154	2,29 €	99,96	4,05	19,25	65,5	254,5	4,82 €	99,98	2,44	9,48	61,5	328,5	6,81 €	99,97	2,42	6,85
10	100	65,75	91,75	6,06 €	99,29	5,71	47,60	54,75	113,75	12,24 €	98,74	16,85	23,42	39,25	123,25	16,96 €	98,43	23,70	18,18
10	500	70,75	96,75	7,33 €	99,82	4,27	47,86	66,75	125,75	14,32 €	99,77	7,65	24,59	58,5	142,5	19,51 €	99,74	10,25	18,7
		N=8																	
1	10	28,75	112,75	1,71 €	98,86	31,69	18,67	24,5	213,5	4,35 €	99,21	16,28	9,60	19,25	286,25	6,25 €	99,40	12,85	6,86
1	100	48,75	132,75	1,92 €	99,85	20,00	18,14	47	236	4,54 €	99,93	7,42	9,42	42,125	309,125	6,48 €	99,91	6,91	6,78
1	500	57	141	2,09 €	99,96	13,11	18,51	56,5	245,5	4,64 €	99,99	4,87	9,46	55,375	322,375	6,62 €	99,99	3,22	6,81
10	100	61,375	87,375	5,04 €	99,36	8,97	47,47	44,75	103,75	10,67 €	98,76	27,66	22,65	29,125	113,125	15,40 €	98,90	31,49	18,64
10	500	66,375	92,375	5,91 €	99,90	5,79	47,86	58,875	117,875	12,59 €	99,77	15,57	23,36	44,875	128,875	17,02 €	99,80	21,70	18,08
		N=12																	
1	10	25,25	109,25	1,77 €	98,97	31,17	18,66	20,33	209,33	4,35 €	99,13	16,79	9,66	14,5	281,5	6,24 €	99,39	13,58	6,92
1	100	46,25	130,25	1,88 €	99,92	19,52	18,34	44,58	233,58	4,52 €	99,92	8,80	9,44	32,5	299,5	6,42 €	99,88	9,48	6,83
1	500	54,83	138,83	1,96 €	99,99	13,54	18,67	54,67	243,67	4,60 €	99,99	5,16	9,48	50,83	317,83	6,55 €	99,99	4,54	6,81
10	100	58,25	84,25	4,72 €	99,53	10,08	47,55	40,08	99,08	10,97 €	98,76	27,91	22,86	25,417	109,417	16,11 €	98,98	31,12	18,62
10	500	63,25	89,25	5,37 €	99,93	7,42	47,77	55,58	114,58	12,74 €	99,77	16,63	23,38	41,917	125,917	16,96 €	99,84	21,48	18,25

$\mu_i = 40, \sigma_i = 10, L_i = 1, ct = 20$

Tableau 5.12. Évaluation des performances en fonction des coûts et du nombre des détaillants

5.5.3 Effet du coût de transshipment

Les résultats de simulation, avec $ch=1$, $cp=100$, $K=100$ et $ct=20$, 50 et 100, sont rapportés dans le tableau 5.13.

Nous constatons que, plus ct s'approche de $cp=K=100$, plus les seuils de stock s croissent et les taux de transshipment diminuent. Le coût total moyen ramené à une unité vendue augmente également. L'explication tient au fait que l'augmentation du coût de transshipment diminue de l'intérêt de ce dernier et favorise la constitution de stock de sécurité. D'autant plus que, K étant constant quel que soit le volume de la commande, il devient plus avantageux d'effectuer des commandes de grands volumes pour le même coût K plutôt que de payer des quantités de transshipment nécessairement plus petites pour un coût qui tend vers K .

Nous retiendrons aussi que l'augmentation du coût moyen unitaire est plus sensible quand le nombre N de détaillants est grand (3.7% pour $N=2$, 24% pour $N=12$). Cela s'explique par le fait que plus N est grand, plus le taux de transshipment est favorable. Par conséquent, c'est quand N est grand que la réduction du taux de transshipment due à l'augmentation de ct est plus importante.

	\bar{s}	\bar{S}	$\overline{E(CT)}$	β^a	%TR	Nb_cds
ct=20	N=2					
	78,5	162,5	2,45 €	99,85	3,22	19,15
	N=4					
	58,75	142,75	2,17 €	99,75	10,16	18,75
	N=8					
	48,75	132,75	1,92 €	99,85	19,52	18,14
ct=50	N=12					
	46,25	130,25	1,88 €	99,92	20	18
	N=2					
	79,5	163,5	2,49 €	99,87	3,08	19,46
	N=4					
	66,25	150,25	2,23 €	99,92	5,70	19,1
ct=100	N=8					
	54,875	138,875	2,09 €	99,95	13,46	18,495
	N=12					
	50,583	134,583	2,07 €	99,96	15,64	18,47
	N=2					
	81,5	165,5	2,54 €	99,91	2,27	19,49
ct=100	N=4					
	69,75	153,75	2,38 €	99,96	4,08	19,24
	N=8					
	63,625	147,625	2,33 €	99,99	7,16	18,99
	N=12					
	62,08	146,08	2,33 €	100,00	8,51	19,01

$\mu_i = 40$, $\sigma_i = 10$, $L_i = 1$, $ch = 1$, $cp = 100$, $K = 100$

Tableau 5.13. Incidences de l'augmentation du coût de transshipment

5.6 Complete pooling standard vs. complete pooling conditionné

Outre la politique complete pooling standard, nous nous proposons d'explorer la politique complete pooling conditionné qui consiste à ne retenir que les transshipments rentables : dans une même période, le complete pooling du détaillant j vers le détaillant i n'est effectué que si son coût fixe est inférieur à la somme des coûts de possession et de rupture pour la même quantité.

$$X_{j,i,t} = \begin{cases} \min \left\{ (d_{i,t} - IL_{i,t}^b)^+, IL_{j,t}^b \right\} & \text{si } ct \leq (cp + ch) * X_{j,i,t} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (74)$$

En d'autres termes, si cette condition n'est pas vérifiée, on considère plus avantageux que le détaillant j conserve son stock tandis que le détaillant i assume entièrement le coût de rupture.

Nous évaluons ces deux politiques dans les cas suivants :

- Cas 1 : $ct=20$, $ch=1$ et $cp=10$; il est évident, d'après l'équation ci-dessus, que le transshipment est permis pour $X_{j,i,t}$ au moins égal à deux unités. Ainsi, lorsqu'il y a une rupture de stock d'une unité chez le détaillant i , le transshipment n'est pas effectué même si le détaillant j possède du stock disponible.
- Cas 2 : $ct=50$, $ch=1$ et $cp=10$; le transshipment est effectué pour $X_{j,i,t}$ au moins égal à 5 unités.
- Cas 3 : $ct=100$, $ch=1$ et $cp=10$; le transshipment est effectué pour $X_{j,i,t}$ au moins égal à 10 unités.
- Cas 4 : $ct=100$, $ch=10$ et $cp=10$; le transshipment est autorisé pour $X_{j,i,t}$ au moins égal à 6 unités.

Pour tous ces cas, nous avons $Q_p < EOQ$. Nous les traitons, donc, avec l'approximation d'une politique de stock du type $(R, s, s+Q_p)$.

Nous examinons ces quatre cas selon les deux politiques de transshipment, pour les valeurs de $K=100$ et $N=2, 4$ et 8 , ce qui donne un total de 24 problèmes.

Les résultats de simulation sont rapportés dans le tableau 5.14. Leur analyse tend à justifier l'intérêt du complete pooling conditionné qui, comparativement au complete pooling standard, amène une très légère réduction du coût total moyen en contrepartie d'un taux de service légèrement moins performant mais satisfaisant le seuil fixé de 98%.

En fait, le complete pooling conditionné vise essentiellement à éviter les transshipments avec perte (i.e. quand le coût fixe ct est supérieur à la perte engendrée par la quantité en rupture), d'où l'explication d'une part de la réduction du coût moyen. Car, pour garantir le taux de service, le complete pooling conditionné doit s'appuyer sur davantage de stock. Le complete pooling standard, quant à lui, procède systématiquement au transshipment chaque fois qu'il est possible, même avec perte. Il compense cela par une légère réduction de la commande et, naturellement, par une amélioration du taux de service.

Les résultats globaux de la simulation confirment, par ailleurs, l'amélioration de l'apport du transshipment avec l'augmentation du nombre de détaillants. Il reste que l'hypothèse d'un coût de transshipment ct forfaitaire (i.e. indépendant de la quantité $X_{j,i,t}$) et l'approximation par une politique de stock du type $(R, s, s+Q_p)$ sont de nature à limiter les possibilités d'une analyse fine. A ajouter à cela le fait que les résultats de simulation sont obtenus à partir du calcul de valeurs moyennes, sachant que les simulations, en elles-mêmes, ne sont pas effectuées avec le même tirage aléatoire.

		Complete pooling standard						Complete pooling conditionné					
		s	S	$\overline{E(CT)}$	β^a	%TR	*CNV	s	S	$\overline{E(CT)}$	β^a	%TR	CNV
ch=1 cp=10 ct=20	N=2	60	144	2,13 €	98,49	15,51	0,31	60	144	2,12 €	98,38	13,54	0,36
	N=4	40	124	1,84 €	98,53	23,3	0,5	40,25	124,25	1,84 €	98,53	23,06	0,49
	N=8	28,75	112,75	1,68 €	99,08	31,69	0,5	31,375	115,375	1,71 €	98,86	30,37	0,53
ch=1 cp=10 ct=50	N=2	66	150	2,24 €	99,09	9,68	1,21	63	147	2,23 €	98,56	8,3	1,47
	N=4	46	130	2,07 €	99,06	19,33	1,94	47,5	131,5	2,07 €	98,95	17,96	1,9
	N=8	32,875	116,875	1,98 €	99,22	29,62	1,99	33,75	117,75	1,98 €	99,06	28,88	2,02
ch=1 cp=10 ct=100	N=2	70	154	2,38 €	99,44	6,08	2,36	68,5	152,5	2,34 €	98,73	5,73	2,75
	N=4	65,25	149,25	2,32 €	99,91	6,09	3,48	65	149	2,28 €	99,13	5,3	3,33
	N=8	61,75	145,75	2,32 €	99,99	8,41	3,7	64,5	148,5	2,29 €	99,28	5,64	3,38
ch=10 cp=10 ct=100	N=2	54	80	5,62 €	92,38	10,57	3,78	55,5	81,5	5,54 €	92,98	9,43	6,35
	N=4	54,75	80,75	4,96 €	94,76	11,14	8,34	53,25	79,25	4,91 €	93,1	11,07	8,07
	N=8	53	79	4,56 €	95,98	12,86	9,54	52	78	4,57 €	94,4	12,7	9,46

$\mu_i = 40, \sigma_i = 10, L_i = 1, K = 100$

*CNV : condition $ct \leq (cp + ch) * X_{j,i,t}$ non vérifiée

Tableau 5.14. Complete pooling standard vs. complete pooling conditionné

5.7 Effet du taux de service

Nous nous focalisons ici sur le critère de la qualité de service sans prendre du compte le coût de rupture. Notre objectif est de déterminer, dans un système de stock fonctionnant selon une politique (R, s_i, s_i+Q_p) avec complete pooling, le point de commande s_i qui minimise le coût total moyen ramené à l'échelle d'une unité vendue $\overline{E(CT)}$, tout en garantissant un seuil minimum SD de taux de service global chez les détaillants. Le problème d'optimisation peut s'écrire comme suit :

$$Min_{s_i; i=1, \dots, N} \overline{E(CT)}$$

$$avec \overline{E(CT)} = \left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^T (B_{i,t} K + E(IL_{i,t}^a) ch + \eta_{i,t} ct) \right) \right) / \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (d_{i,t} - QP_{i,t})$$

s.c. $s_i \geq 0$: entier positif ou nul ; $i = 1, \dots, N$

et

$$1 - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T QP_{i,t} / \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T d_{i,t} \geq SD$$

Nous étudions alors, pour des paramètres coûts fixés (K , ch et ct), l'effet de la variation de l'exigence en taux de service minimum. Nous avons effectué des simulations pour des combinaisons de deux valeurs de ch (1 et 10) avec trois valeurs de K (100, 500 et 1000) et en fixant ct à 20. Les résultats de simulation sont présentés dans le tableau 5.15.

L'analyse de ce tableau montre que :

- Plus l'exigence en taux de service est forte, plus la nécessité de stock de sécurité est importante ; ce qui réduit le recours au transshipment et, en conséquence globale, fait augmenter le coût moyen unitaire. Inversement, plus l'exigence en taux de service est faible, plus la nécessité en stock de sécurité est relâchée. Dans ces conditions, le recours au transshipment devient plus fréquent et, globalement, le coût moyen unitaire est réduit. Ce constat est valable pour toutes les combinaisons de ch , K et N .
- L'augmentation du coût de possession a pour conséquence de réduire la quantité de rechargement Q_p . D'où la nécessité d'une compensation par l'augmentation du seuil s et, donc, une augmentation du coût moyen unitaire.
- D'une façon plus générale, plus le coût de commande K augmente, plus le coût moyen unitaire augmente. Cette augmentation du coût moyen unitaire ainsi que celle du taux de transshipment se confirment davantage avec l'augmentation du coût de possession ch .
- Quant à l'augmentation du nombre N des détaillants, elle est de nature à favoriser le taux de transshipment. Par conséquent, il y a un besoin moindre en stock et, donc, un effet positif de réduction du coût moyen unitaire.

		K=100					K=500					K=1000				
		\bar{s}	\bar{S}	$\overline{E(CT)}$	β^a	%TR	\bar{s}	\bar{S}	$\overline{E(CT)}$	β^a	%TR	\bar{s}	\bar{S}	$\overline{E(CT)}$	β^a	%TR
SD	ch	N=2														
99	1	65,5	149,5	1,02 €	99,03	8,62	50,5	239,5	2,25 €	98,90	10,32	45	312	3,22 €	98,95	9,56
95		45,5	129,5	0,90 €	95,00	24,54	25	214	2,14 €	95,41	23,32	16,5	283,5	3,10 €	95,19	18,51
90		28,5	112,5	0,84 €	89,98	30,38	8,5	197,5	2,12 €	90,02	25,43	5,5	272,5	3,10 €	92,07	18,18
99	10	70	96	3,26 €	98,99	5,62	69	128	6,99 €	99,03	7,67	65,5	149,5	9,93 €	99,03	8,62
95		58,5	84,5	2,36 €	94,93	9,98	50,5	109,5	5,63 €	94,90	26,28	43,5	127,5	8,36 €	95,00	28,68
90		51,5	77,5	2,03 €	90,46	13,89	37,5	96,5	5,06 €	89,94	38,99	28,5	112,5	7,67 €	89,98	40,38
		N=4														
99	1	42,75	126,75	0,43 €	99,02	21,58	31,5	220,5	1,08 €	99,05	13,27	22,75	289,75	1,55 €	98,95	11,48
95		22,5	106,5	0,40 €	94,93	31,34	5,5	194,5	1,05 €	95,36	19,32	4,75	271,75	1,54 €	97,02	14,47
90		12,75	96,75	0,39 €	90,34	33,60	5	193	1,05 €	94,92	19,44	4,75	271,75	1,54 €	97,02	14,47
99	10	64,5	90,5	1,27 €	99,04	6,68	55,75	114,75	2,77 €	98,95	16,11	43	127	3,95 €	99,02	21,41
95		55,25	81,25	0,93 €	95,09	10,85	36,75	95,75	2,23 €	94,89	29,39	22,5	106,5	3,50 €	94,95	31,33
90		49	75	0,79 €	90,24	15,97	27,5	86,5	2,12 €	89,99	32,42	12,25	96,25	3,44 €	90,10	33,71
		N=8														
99	1	29,25	113,25	0,20 €	99,05	31,41	21,75	210,75	0,53 €	99,01	17,08	13,25	280,25	0,77 €	99,03	13,90
95		10	94	0,19 €	95,06	38,03	3,75	192,75	0,53 €	95,49	19,00	1,75	268,75	0,77 €	97,78	15,21
90		9,38	93,38	0,19 €	90,35	38,13	3	192	0,53 €	95,27	19,91	1,75	268,75	0,77 €	97,78	15,21
99	10	59,63	85,63	0,51 €	98,92	9,85	45,875	104,875	1,19 €	98,93	26,82	28,625	112,625	1,78 €	99,05	31,75
95		51,88	77,88	0,41 €	95,11	13,92	30,75	89,75	1,03 €	95,19	35,44	7,125	91,125	1,66 €	94,56	38,56
90		46,63	72,63	0,37 €	90,19	15,86	24	83	1,01 €	90,94	36,12	5,625	89,625	1,66 €	93,77	38,77
		N=12														
99	1	26	110	0,14 €	98,97	30,08	18,92	207,92	0,35 €	99,02	17,19	8,67	275,67	0,51 €	99,03	14,46
95		4,83	88,83	0,18 €	96,20	35,05	0,83	189,83	0,35 €	96,06	19,18	0,33	267,33	0,51 €	98,33	15,60
90		4,83	88,83	0,18 €	96,20	35,05	0,83	189,83	0,35 €	96,04	19,16	0,33	267,33	0,51 €	98,33	15,60
99	10	55,5	81,5	0,33 €	99,02	11,61	42,67	101,67	0,83 €	99,01	26,32	25,08	109,08	1,26 €	98,95	29,15
95		47,50	73,50	0,28 €	95,36	16,94	26,33	85,33	0,76 €	95,37	32,89	3,42	87,42	1,21 €	95,77	35,26
90		41,83	67,83	0,26 €	91,02	20,11	20,17	79,17	0,75 €	91,02	33,04	1,92	85,92	1,21 €	95,24	35,32

$\mu_i = 40, \sigma_i = 10, L_i = 1, ct = 20$

Tableau 5.15. Évaluation des performances en fonction des taux de service exigés et du nombre des détaillants

5.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité le problème du transshipment multi détaillants dans un réseau de distribution à deux échelons, pour lequel nous avons mené une étude empirique sur un jeu d'instances aléatoires. Nous nous sommes intéressés à examiner l'influence d'un certain nombre de paramètres agissant sur le comportement du système de stock, à savoir l'écart type de la demande, le délai d'approvisionnement, le nombre des détaillants, les coûts de commande, de possession, de rupture et de transshipment ainsi que le taux de service.

Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à mesurer l'impact des paramètres d'entrée (nombre de détaillants, écart type et délai d'approvisionnement) sur le bénéfice du complete pooling standard dans un système de stock (R, s, S) . Nous avons aussi examiné l'impact du complete pooling plafonné, tenant compte de la capacité du transshipment, sur les performances du système de stock. Cette étude nous a permis d'identifier les conditions sous lesquelles le complete pooling plafonné apporte un gain vis-à-vis du complete pooling standard.

L'approche de simulation-optimisation que nous avons adoptée a le mérite d'aboutir à une résolution assez fine. Cependant, la complexité de la résolution augmente considérablement avec l'augmentation du nombre N des détaillants (2h pour $N=2$, 15h pour $N=4$, 60h pour $N=8$). Pour approfondir l'examen de l'influence des différents coûts (commande, possession, rupture et transshipment), en élargissant la simulation jusqu'à $N=12$, nous avons trouvé utile de substituer à la politique de stock (R, s, S) une politique de type $(R, s, s+Q)$ avec Q égal au minimum des deux quantités approximatives EOQ et Q_p proposées respectivement par (Wilson 34) et par (Ehrhardt et Mosier 84).

La comparaison expérimentale du comportement des trois politiques (R, s, S) , $(R, s, s+EOQ)$ et $(R, s, s+Q_p)$ nous a confortée dans cette orientation. L'écart dans l'estimation de la valeur de s est inférieur à 3.4% et le gain en réduction du temps de résolution est approximativement de 50%. L'écart dans l'estimation de la valeur de S est relativement important pour des délais d'approvisionnement courts ($L_i=1$) ; il se réduit à moins de 2.6% pour des délais d'approvisionnement plus raisonnables ($L_i=3$).

De la sorte, nous avons pu effectuer un grand nombre de tests qui nous ont permis de mettre en évidence l'influence de chacun des coûts et, notamment, de situer les contextes où le recours systématique au transshipment est bénéfique. D'une façon générale, l'augmentation du coût de commande K et/ou du coût de rupture c_p conduit à développer les stocks et, par conséquent, à réduire le besoin du recours au transshipment. Tandis que l'augmentation du coût de possession et/ou du nombre de détaillants donne de l'intérêt au recours au transshipment.

L'exploration des variantes consistant en le complete pooling plafonné et le complete pooling conditionné révèle un nouvel enseignement particulièrement intéressant. En effet, on constate que le fait de contraindre les décisions de transshipment (par une quantité maximum dans le cas du complete pooling plafonné ou par une quantité minimum dans le cas du complete pooling conditionné) améliore le rendement de la mise en œuvre du transshipment. Rappelons que, dans le complete pooling standard,

le transshipment est effectué systématiquement chaque fois qu'il est possible, même à perte.

Dans le chapitre suivant, nous nous proposons de complexifier la structure du réseau de distribution en passant à un système multi échelons dans lequel le centre de distribution n'est plus considéré à capacité infinie mais doit lui même gérer son stock selon la politique de gestion (R, s, S).

Chapitre 6 : Transshipment dans un réseau de distribution multi échelons

-
- 6.1 Système de stock avec transshipment dans un réseau de distribution multi échelons
 - 6.1.1 Description du problème
 - 6.1.2 Hypothèses du modèle
 - 6.1.3 Notations
 - 6.2 Démarche de résolution
 - 6.2.1 Procédures d'allocation du stock disponible au niveau du centre de distribution
 - 6.2.2 Formulation des problèmes d'optimisation
 - 6.2.3 Solutions initiales
 - 6.2.4 Modèle de stock intégrant le transshipment d'un système multi échelons
 - 6.2.5 Modèle de simulation-optimisation
 - 6.3 Les résultats numériques
 - 6.3.1 Étude du problème d'optimisation 1
 - 6.3.2 Étude du système de stock à multi échelons sous contrainte de taux de service
 - 6.3.3 Évaluation des solutions initiales
 - 6.4 Conclusion
-

6.1 Système de stock avec transshipment dans un réseau de distribution multi échelons

6.1.1 Description du problème

Nous considérons un réseau de distribution multi échelons composé d'un fournisseur, d'un centre de distribution et de deux détaillants (cf. Figure 6.1) et fonctionnant en complete pooling. Nous supposons que les délais d'approvisionnement du fournisseur au centre de distribution (L_{CD}) et du centre de distribution aux détaillants (L) sont fixes.

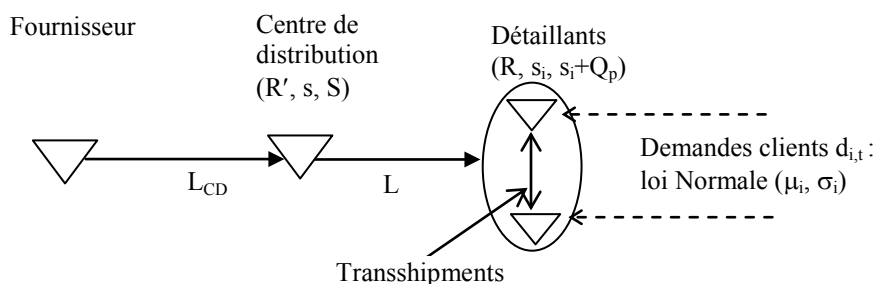


Figure 6.1. Réseau de distribution multi échelons intégrant le transshipment

Nous supposons également que les demandes clients s'effectuent exclusivement à travers les détaillants. Ainsi, la demande chez le centre de distribution représente uniquement les commandes détaillants (cf. Figure 6.2). Le fournisseur est considéré à capacité infinie.

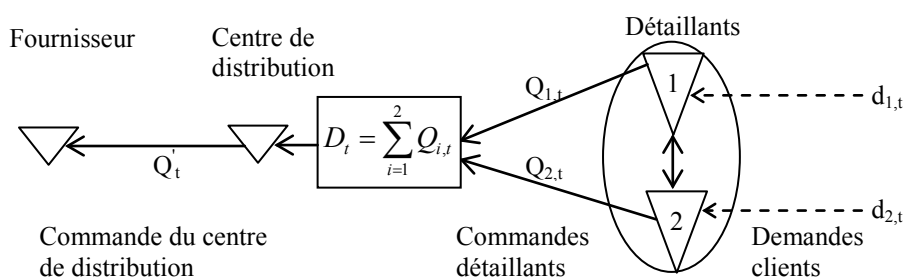


Figure 6.2. Flux des commandes dans un réseau de distribution multi échelons avec transshipment

Les détaillants gèrent leurs stocks selon la politique (R, s_i, s_i+Q_p) . La période de révision (R) est fixée à une période. Ainsi, à la fin de chaque période t , chaque détaillant i contrôle sa position de stock $IP_{i,t}^a$ et passe une commande $Q_{i,t}$ vers le centre de distribution si l'équation (75) est vérifiée. La livraison de cette commande au détaillant i s'effectuera au début de la période $t+L+1$.

$$Q_{i,t} = \begin{cases} S_i - IP_{i,t}^a & \text{si } IP_{i,t}^a \leq s_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{75}$$

Le centre de distribution gère son stock selon la politique (R', s, S) . La période de révision R' est considérée égale à deux périodes. A la fin de chaque période t correspondant à une période de révision, le centre de distribution contrôle sa position de stock P_t^a (stock disponible + stock en commande) et passe une commande Q_t' vers le fournisseur si l'équation (76) est vérifiée. La livraison de cette commande au centre de distribution s'effectuera au début de la période $t+L_{CD}+1$.

$$Q_t' = \begin{cases} S - P_t^a & \text{si } P_t^a \leq s \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (76)$$

6.1.2 Hypothèses du modèle

Nous considérons dans notre modèle les hypothèses suivantes :

- (H₁) Les demandes par période, chez chaque détaillant, sont aléatoires (loi normale), indépendantes et identiquement distribuées.
- (H₂) A chaque période t , il est effectué chez chacun des détaillants la séquence d'opérations suivante : 1) réception partielle ou totale de la commande effectuée auprès du centre de distribution à $t-L-1$ (voir, plus loin, procédures d'allocation du stock disponible), 2) observation de la demande client, 3) traitement des transshipments et 4) passation d'un ordre d'approvisionnement vers le centre de distribution si l'équation (75) est vérifiée.
- (H₃) A chaque période de révision t , il est effectué au centre de distribution la séquence d'opérations suivante : 1) réception de la commande effectuée auprès du fournisseur à $t-L_{CD}-1$, 2) gestion et livraison des commandes détaillants et 3) passation d'un ordre d'approvisionnement vers le fournisseur si l'équation (76) est vérifiée.
- (H₄) La demande (ou partie de la demande) non satisfaite par les détaillants est considérée comme perdue.

6.1.3 Notations

Nous adoptons les notations suivantes :

Pour les détaillants ($i=1, 2$) :

K	Coût fixe de commande
ch	Coût de possession par unité de produit et par période
cp	Coût de rupture par unité de produit
ct	Coût fixe de transshipment
$IL_{i,t}^a$	Niveau de stock chez le détaillant i à la fin de la période t
$QP_{i,t}$	Demande perdue par le détaillant i à la période t
$\eta_{i,t}$	Variable booléenne égale à 1 si le détaillant i a reçu un transshipment à la période t et 0 sinon
$B_{i,t}$	Variable booléenne égale à 1 si le détaillant i passe une commande à la période t et 0 sinon
SD_i	Service désiré local au détaillant i
SD	Service global désiré pour le système entier
β^a	Service global obtenu par le modèle de simulation
CD_i	Coût total pour le détaillant i

Pour le centre de distribution :

K'	Coût de commande fixe
ch'	Coût de possession par unité de produit et par période
D_t	Commande agrégée des détaillants chez le centre de distribution à la période t
$QL_{i,t}$	Quantité livrée par le centre de distribution au détaillant i à la période t
ω_t	Variable booléenne qui prend la valeur 1 si le centre de distribution passe une commande au fournisseur à la fin de la période t et 0 sinon
I_t^b	Niveau de stock chez le centre de distribution au début de la période t
P_t^b	Position de stock chez le centre de distribution au début de la période t
I_t^a	Niveau de stock chez le centre de distribution à la fin de la période t
P_t^a	Position de stock chez le centre de distribution à la fin de la période t
TS	Taux de satisfaction des commandes détaillants chez le centre de distribution
CC	Coût total du centre de distribution

Pour le système de distribution

CT	Coût total du système
T	Horizon fini de temps

Nous nous situons d'abord dans un système de stock sans transshipment et nous déterminons des solutions initiales pour le centre de distribution et les détaillants. Nous développons ensuite le modèle analytique d'un système de stock avec transshipment dans un réseau de distribution. Enfin, nous donnons le modèle de simulation-optimisation correspondant. Ce modèle est testé via une large étude expérimentale dans laquelle nous examinons, vis-à-vis des performances du système,

- les effets du délai d'approvisionnement du centre de distribution, du délai d'approvisionnement des détaillants et de l'écart type des demandes ;
- l'effet des procédures d'allocation du stock disponible au niveau du centre de distribution ;
- l'effet de la politique (R' , s , S) au niveau du centre de distribution ;
- l'effet du taux de service pour le cas des systèmes de stock exigeant un taux de service global et pour le cas des systèmes de stock exigeant un taux de service spécifique à chaque détaillant.

6.2 Démarche de résolution

6.2.1 Procédures d'allocation du stock disponible au niveau du centre de distribution

Ces procédures déterminent la manière dont les commandes détaillants sont traitées par le centre de distribution. Nous distinguons deux cas possibles :

- Le stock disponible (I_t^b) chez le centre de distribution est suffisant pour satisfaire toutes les commandes détaillants. Par conséquent, au début de la période $t+L+1$, les positions de stocks des détaillants seront ramenées à S_i .
- Le stock disponible (I_t^b) chez le centre de distribution est insuffisant pour satisfaire toutes les commandes détaillants. Dans ce cas, nous proposons deux procédures d'allocation pour rationner le stock disponible du centre de distribution entre détaillants. Dans la première procédure, si l'une des commandes est inférieure à la moitié du stock disponible alors elle est satisfaite

entièrement et le restant du stock est alloué à l'autre commande. Sinon, le centre de distribution répartit le stock disponible de manière égale (**équitable**) entre les deux détaillants. Dans la deuxième procédure, le stock disponible est réparti de manière proportionnelle aux volumes des commandes détaillants. Nous présentons ci-dessous les formulations de ces deux procédures.

Procédure d'allocation 1 (PA 1)

Si $D_t > I_t^b$ alors

S'il $\exists i=1$ ou 2 tel que $Q_{i,t} < I_t^b/2$ alors $QL_{i,t+L+1}=Q_{i,t}$ et $QL_{j,t+L+1}=I_t^b-Q_{i,t}$, $j \neq i$

Sinon $QL_{i,t+L+1} = \lfloor I_t^b/2 \rfloor$ et $QL_{j,t+L+1} = I_t^b - QL_{i,t+L+1}$

Procédure d'allocation 2 (PA 2)

$QL_{i,t+L+1} = \lfloor I_t^b * (Q_{i,t} / D_t) \rfloor$ et $QL_{j,t+L+1} = I_t^b - QL_{i,t+L+1}$

6.2.2 Formulation des problèmes d'optimisation

Dans ce chapitre, nous proposons d'étudier la résolution du problème de transshipment selon trois objectifs différents. Le premier objectif est celui de la minimisation du coût total du système (coût du centre de distribution + coûts de commande, de possession, de rupture et de transshipment chez les détaillants). Le deuxième objectif est celui de la minimisation du coût total du système, sans coût de rupture mais sous la contrainte d'un taux de service (SD) global pour les deux détaillants. Le troisième objectif est la minimisation du coût total du système, toujours sans coût de rupture mais avec une contrainte de taux de service désiré (SD_i) spécifique à chaque détaillant i .

Pour chacun de ces objectifs, il s'agit de déterminer les valeurs optimales des seuils de stock (s , S) chez le centre de distribution et des points de commande chez les détaillants (s_i ; $i=1, 2$). Le niveau de reapprovisionnement pour chaque détaillant i sera calculé par $S_i = s_i + Q_p$.

Les trois problèmes d'optimisation qui en résultent peuvent être formulés comme suit :

Problème d'optimisation 1 : Minimisation du coût total du système

$$E(CT) = \underset{\substack{s_i, i=1,2 \\ (s,S)}}{\text{Min}} \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T (B_{i,t} K + E(IL_{i,t}^a) ch + E(QP_{i,t}^a) cp + \eta_{i,t} ct) + \sum_{t=1}^T (\omega_t K' + E(I_t^a) ch) \right)$$

s.c. $s_i \geq 0$: entiers, $i = 1, 2$

$s \geq 0, S \geq 1$: entiers

Problème d'optimisation 2 : Minimisation du coût total du système, sans coût de rupture mais sous la contrainte d'un taux de service (SD) global

$$E(CT) = \underset{\substack{s_i; i=1,2 \\ (s,S)}}{\text{Min}} \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T (B_{i,t} K + E(IL_{i,t}^a) ch + \eta_{i,t} ct) + \sum_{t=1}^T (\omega_t K' + E(I_t^a) ch') \right)$$

s.c. $s_i \geq 0$: entiers , $i = 1, 2$

$s \geq 0, S \geq 1$: entiers

$$1 - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T QP_{i,t} / \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T d_{i,t} \geq SD$$

Problème d'optimisation 3 : Minimisation du coût total du système, sans coût de rupture mais avec contrainte d'un taux de service désiré (SD_i) spécifique à chaque détaillant

$$E(CT) = \underset{\substack{s_i; i=1,2 \\ (s,S)}}{\text{Min}} \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T (B_{i,t} K + E(IL_{i,t}^a) ch + \eta_{i,t} ct) + \sum_{t=1}^T (\omega_t K' + E(I_t^a) ch') \right)$$

s.c. $s_i \geq 0$: entiers , $i = 1, 2$

$s \geq 0, S \geq 1$: entiers

$$1 - \sum_{t=1}^T QP_{i,t} / \sum_{t=1}^T d_{i,t} \geq SD_i \quad , i = 1, 2$$

6.2.3 Solutions initiales

Pour résoudre les problèmes d'optimisation cités ci-dessus, nous développons une procédure analytique permettant de déterminer, dans un système de stock sans transshipment, les seuils initiaux de stock s_i pour les détaillants et les seuils s et S pour le centre de distribution.

6.2.31 Pour les détaillants

Nous supposons, ici, que chaque détaillant gère son stock de manière indépendante.

6.2.311 Solution initiale pour le problème d'optimisation 1

Nous adoptons, pour le problème d'optimisation 1, l'heuristique de Ehrhardt et Mosier (Ehrhardt et Mosier 84) qui consiste à déterminer s et S en se basant sur un coût de rupture donné :

Étape 1 : Calculer la quantité de commande approchée Q_p et le point de commande approché s_p :

$$Q_p = 1.30 \mu^{0.494} (K/ch)^{0.506} (1 + \sigma_{L+1}^2 / \mu^2)^{0.116}$$

et

$$s_p = 0.973 \mu_{L+1} + \sigma_{L+1} \left(\frac{0.183}{z} + 1.063 - 2.192z \right)$$

$$\text{avec } z = \sqrt{\frac{Q_p ch}{\sigma_{L+1} cp}}$$

Étape 2 : Si $Q_p / \mu > 1.5$ alors

$$s = s_p$$

$$S = s_p + Q_p$$

Sinon Calculer

$$S_0 = \mu_{L+1} + k \sigma_{L+1}$$

$$s = \min \{s_p, S_0\}$$

$$S = \min \{s_p + Q_p, S_0\}$$

avec un facteur de sécurité k qui satisfait l'équation $p_{u \geq}(k) = \frac{ch}{ch + cp}$

6.2.312 Solution initiale pour les problèmes d'optimisation 2 et 3

Nous proposons d'utiliser la même quantité de commande approchée Q_p calculée selon l'heuristique de Ehrhardt et Mosier, et de déterminer les seuils de commande s_i selon la formule proposée dans (Silver et al. 98).

L'estimation du point de commande qui garantit un taux de service désiré est donnée par :

$$s_i^0 = \mu_i (L+1) + k \sigma_i \sqrt{L+1} \quad (77)$$

Sous l'hypothèse de demandes perdues, le facteur de sécurité k_i est solution de l'équation :

$$G_u(k) = \frac{Q_p}{\sigma_i \sqrt{L+1}} \left(\frac{1 - SD}{SD} \right) \quad (78)$$

avec

G_u : fonction qui suit la loi normale centrée réduite

$$G_u(k) = \int_{k_i}^{\infty} (u - k) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp[-u^2 / 2] du$$

Le niveau de recomplètement sera calculé par :

$$S_i^0 = s_i^0 + Q_p \quad (79)$$

6.2.32 Pour le centre de distribution

6.2.321 Solution initiale pour le niveau de reapprovisionnement

Nous proposons d'adopter le concept du stock échelon proposé par Clark et Scarf (Clark et Scarf 60). Ainsi, le niveau de reapprovisionnement initial dans le centre de distribution est pris égal au stock échelon du système entier :

S^0 = stock échelon initial

= position de stock initiale du centre de distribution + la somme des positions de stock initiales des deux détaillants

Nous supposons qu'à la période $t=1$, il n'y a pas de commandes initiales auprès du fournisseur ni auprès du centre de distribution. De plus, la position de stock initiale du centre de distribution se restreint à la demande clients durant $L_{CD}+R'$ périodes chez les détaillants. Nous obtenons alors :

$$S^0 = N\mu_i(L_{CD} + R') + \sum_{i=1}^N S_i^0 \quad (80)$$

avec

N =nombre des détaillants, ici $N=2$

6.2.321 Solution initiale pour le point de commande

Nous ajoutons à la demande clients, durant les $L_{CD}+R'$ périodes, la prise en compte du facteur de sécurité en adoptant l'effet \sqrt{N} (Pimor 03) :

$$s^0 = N \mu_i(L_{CD} + R') + k \sigma_i \sqrt{N} \sqrt{L_{CD} + R'} \quad (81)$$

Cette expression suppose que les demandes clients sont identiques en moyenne et écart type, ce qui est le cas ici.

Pour le problème d'optimisation 1, nous considérons pour k la valeur déterminée par l'équation $p_{u \geq}(k) = ch/(ch + cp)$ dans laquelle intervient le coût de rupture.

Pour les problèmes d'optimisation 2 et 3, nous considérons pour k la valeur déterminée par l'équation $G_u(k) = \frac{Q_p}{\sigma_i \sqrt{L+1}} \left(\frac{1-SD}{SD} \right)$ dans laquelle intervient le seuil de service désiré.

Nous considérons les valeurs de s^0 , S^0 , s_i^0 et S_i^0 comme des solutions initiales pour le modèle de simulation-optimisation.

6.2.4 Modèle de stock intégrant le transshipment d'un système multi échelons

6.2.41 Modèle de stock (R, s, S) pour le centre de distribution

A la période $t=1$, nous supposons qu'il n'y a pas de commandes en transit ni auprès du fournisseur ni de la part des détaillants et, donc, le niveau initial de stock et la position initiale de stock sont égaux à S^0 .

Au début de chaque nouvelle période t , la séquence d'opérations suivante est effectuée : arrivée des livraisons pour les commandes effectuées auprès du fournisseur (équation (82)), réception des commandes détaillants (équation (83)), réservation de stocks pour les détaillants (équations (84-85)) et passation de commande vers le fournisseur (équation (86)).

$$I_t^b = I_t^b + Q_{t-L_{CD}-1} \quad (82)$$

$$D_t = \sum_{i=1}^2 Q_{i,t} \quad (83)$$

$$P_t^a = P_t^b - \sum_{i=1}^2 QL_{i,t} \quad (84)$$

$$I_t^a = I_t^b - \sum_{i=1}^2 QL_{i,t} \quad (85)$$

$$P_t^a = P_t^a + Q_t \quad (86)$$

Finalement, la position et le niveau de stock de la période suivante sont mises à jour :

$$P_{t+1}^b = P_t^a \quad (87)$$

$$I_{t+1}^b = I_t^a \quad (88)$$

Les équations (82 et 86) traduisent les interactions avec le fournisseur. Les équations (83 à 85) traduisent les interactions avec les détaillants. Les équations assurent le passage d'une étape à la suivante.

6.2.42 Modèle de stock (R, s, S) avec demandes perdues pour les détaillants

A la période $t=1$, nous supposons qu'il n'y a pas de commandes en transit ni auprès du centre de distribution ni de la part des clients et que le niveau initial de stock et la position initiale de stock sont égaux à S_i^0 .

Au début de chaque nouvelle période t , la séquence d'opérations suivante est effectuée : réception des livraisons pour les commandes effectuées auprès du centre de distribution (équation (89)), satisfaction des demandes clients (équations (90-91)),

réalisation du transshipment (équations (92-93)) et passation de commande vers le centre de distribution (équation (94)).

$$IP_{i,t}^b = IP_{i,t}^b + QL_{i,t-L-1} \quad (89)$$

$$IP_{i,t}^b = \max(0; IP_{i,t}^b - d_{i,t}) \quad (90)$$

$$IL_{i,t}^b = \max(0; IL_{i,t}^b - d_{i,t}) \quad (91)$$

$$IP_{i,t}^a = IP_{i,t}^b - X_{i,j,t} \quad (92)$$

$$IL_{i,t}^a = IL_{i,t}^b - X_{i,j,t} \quad (93)$$

$$IP_{i,t}^a = IP_{i,t}^a + Q_{i,t} \quad (94)$$

Finalement, la position et le niveau de stock de la période suivante sont mises à jour :

$$IP_{i,t+1}^b = IP_{i,t}^a \quad (95)$$

$$IL_{i,t+1}^b = IL_{i,t}^a \quad (96)$$

Les modèles de stock pour le centre de distribution et les détaillants sont implémentés sous tableur Excel®.

6.2.5 Modèle de simulation-optimisation

Rappelons qu'il s'agit de cerner la combinaison optimale des seuils de stock (s, S) pour le centre de distribution et le seuil optimal s_i pour chaque détaillant i , $i=1, 2$. Nous construisons l'espace de recherche comme suit :

Pour le centre de distribution :

Nous fixons les valeurs de (s, S) dans deux intervalles :

- $[LB_{w1}, UB_{w1}]$ pour s, avec $LB_{w1} = N\mu_i L_{CD}$ (i.e. le point de commande du centre de distribution doit couvrir, durant le délai L_{CD} , au moins la demande clients des détaillants) et $UB_{w1} = s^0$.
- $[LB_{w2}, UB_{w2}]$ pour S, avec $LB_{w2} = N\mu_i(L_{CD} + L)$ (i.e. le niveau de rechargement du centre de distribution doit également couvrir, durant $(L_{CD}+L)$ périodes, au moins la demande clients des détaillants) et $UB_{w2} = S^0$.

Pour les détaillants :

Nous fixons, pour chaque détaillant i , les valeurs du seuil s_i dans un intervalle :

$[LB_i, UB_i]$, avec $LB_i = \mu_i L$ (i.e. le point de commande d'un détaillant doit couvrir au moins sa propre demande clients durant son délai L) et $UB_i = s_i^0$.

Nous constatons que le nombre de combinaisons possibles dans l'espace de recherche est combinatoire. Pour cela, nous proposons de dérouler l'optimisation par l'outil OptQuest du Crystal Ball 7.2® en deux phases. Dans la première phase, la recherche pour (s, S) et s_i est effectuée dans les intervalles définis ci-dessus avec un pas de discrétisation de cinq unités. À la fin de cette phase, l'OptQuest donne la meilleure combinaison parmi celles évaluées minimisant le coût total du système. Nous notons cette première solution par (s', S') pour le centre de distribution et s'_i pour chaque détaillant i . Dans la deuxième phase, une nouvelle recherche est effectuée autour de cette solution en utilisant un pas de discrétisation d'une unité et en restreignant les intervalles comme suit :

- $LB_{w1} = s'-5; UB_{w1} = s'+5$
- $LB_{w2} = S'-5; UB_{w2} = S'+5$
- $LB_i = s'_i-5; UB_i = s'_i+5$

Finalement, la phase d'optimisation fournit, en sortie, les meilleurs seuils de stock (s, S) pour le centre de distribution et le meilleur seuil s_i pour chaque détaillant i réalisant l'objectif visé.

6.3 Les résultats numériques

Les expériences sont réalisées avec les paramètres d'entrée : $N=2, K=100, ch=1, cp=100, ct=20, K'=500, ch'=1, \mu_i=40, T=52$ en considérant différentes valeurs pour L, L_{CD}, σ_i, SD et SD_i (voir tableau 6.1). Nous considérons les mesures de performance suivantes : coût total moyen du système $E(CT)$, taux de service détaillants (β^a), taux de transshipment (%TR) et taux de satisfaction des commandes détaillants chez le centre de distribution (%TS).

Paramètres	Valeurs
L	1 ; 3
L_{CD}	2 ; 5
σ_i	10 ; 20
SD, SD_i	99 ; 95 ; 90

Tableau 6.1. Paramètres d'entrée pour les exemples numériques

6.3.1 Étude du problème d'optimisation 1

Nous examinons l'effet de trois paramètres d'entrée sur les bénéfices du transshipment à savoir :

- le délai d'approvisionnement du centre de distribution ;
- le délai d'approvisionnement des détaillants ;
- l'écart type de la demande.

Ce travail a été publié dans (Tlili et al. 10b).

6.3.1.1 Impact du délai d'approvisionnement du centre de distribution

L'étude de l'impact de la variation du délai d'approvisionnement du centre de distribution est réalisée dans les cas où $\mu_i=40, \sigma_i=10$ (ou 20), $L=1$ et $L_{CD}=2$ puis 5. La

simulation est effectuée pour chacune des procédures d'allocation PA 1 et PA 2. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.2. Leur analyse se présente comme suit :

- avec un coût de rupture $cp=100$ et un coût fixe de transshipment $ct=20$, on aurait pu s'attendre à un recours important aux transshipments notamment pour compenser le passage de délai $L_{CD}=2$ à $L_{CD}=5$. La simulation donne, pourtant, des valeurs de transshipments faibles. L'explication peut provenir du fait que, avec $cp=100$, un coût de commande constant ($K=100$ et $K'=500$) et un coût de possession faible ($ch=1$), la minimisation du coût total trouve sa solution dans la satisfaction totale des demandes clients. Ainsi, les seuils s_i sont déterminés pour assurer un taux de service quasiment de 100% alors que le centre de distribution va compter sur le stock pour satisfaire les demandes résultantes des détaillants.
- Selon cette interprétation, on comprend que les valeurs des seuils s_i soient restées peu sensibles à la variation du délai L_{CD} mais raisonnablement sensibles à l'augmentation de l'écart type.
- Avec l'optique d'une satisfaction totale des demandes clients, il est normal de ne pas constater une différence sensible entre les comportements des procédures d'allocation de stock.
- L'augmentation du coût total ne suit pas celle des stocks chez le centre de distribution en passant de $L_{CD}=2$ à $L_{CD}=5$. Cette augmentation est loin d'être linéaire, vraisemblablement à cause du coût constant de la commande et du faible coût de possession. En fait, l'examen détaillé de nos résultats de simulation nous a montré que, en passant de $L_{CD}=2$ à $L_{CD}=5$, le total des coûts de commande est resté quasiment constant et que l'explication de l'augmentation du coût total est due à celle du coût total de possession qui, lui, augmente linéairement avec le stock.

		Détaillants				Centre de distribution			Système
		$\% \beta^a$	\bar{s}	\bar{S}	$\%TR$	$\%TS$	s	S	E(CT)
PA 1									
$\sigma_i=10$	$L_{CD}=2$	99,72	94	178	2,97	99,17	337	495	30 819,04 €
$\sigma_i=10$	$L_{CD}=5$	99,66	97,5	181,5	2,82	99,16	584	730	32 753,25 €
%Diff		-0,07	3,72	1,97	-4,92	0	73,29	47,47	6,28
$\sigma_i=20$	$L_{CD}=2$	99,56	107	194	4,34	99,45	366	541	34 197,05 €
$\sigma_i=20$	$L_{CD}=5$	99,53	106	193	4,01	99,29	647	804	36 870,46 €
%Diff		-0,03	-0,93	-0,52	-7,44	-0,16	76,78	48,61	7,82
PA 2									
$\sigma_i=10$	$L_{CD}=2$	99,58	93	177	3,43	99,02	323	490	30 934,44 €
$\sigma_i=10$	$L_{CD}=5$	99,62	93,5	177,5	2,96	99,23	587	733	32 685,01 €
%Diff		0,04	0,54	0,28	-13,55	0,21	81,73	49,59	5,66
$\sigma_i=20$	$L_{CD}=2$	99,71	105	192	4,14	99,24	367	545	33 649,78 €
$\sigma_i=20$	$L_{CD}=5$	99,54	107	194	3,85	99,26	645	802	36 818,36 €
%Diff		-0,17	1,9	1,04	-6,89	0,02	75,75	47,16	9,42

$\mu_i = 40, L = 1, ct = 20, ch = ch' = 1, cp = 100, K = 100, K' = 500$

Tableau 6.2. Comparaison des performances pour $L_{CD}=2$ vs. $L_{CD}=5$

6.3.12 Impact du délai d'approvisionnement des détaillants

L'étude de l'impact de la variation du délai d'approvisionnement des détaillants est réalisée dans les cas où $\mu_i=40$, $\sigma_i=10$ (ou 20), $L_{CD}=5$ et $L=1$ puis 3. La simulation est effectuée pour chacune des procédures d'allocation PA 1 et PA 2. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.3.

De prime abord, nous constatons que, avec le choix des paramètres $ch=1$ (coût de possession faible), $cp=100$ (coût de rupture fort) et $ct=20$ (coût de transshipment fixe=20 fois le coût de possession), la minimisation du coût total a tendance à trouver ses solutions dans la satisfaction totale des demandes clients en s'appuyant principalement sur les stocks. Aussi, pour une variation faible de la demande ($\sigma_i=10$), le comportement du centre de distribution est quasiment insensible au passage du délai $L=1$ à $L=3$, mais, néanmoins, réagit à l'augmentation cumulée de cette variation ($\sigma_i=20$) et du délai ($L=3$). Globalement, la compensation de l'effet du changement de délai est assurée dans sa quasi totalité par la gestion de stock au niveau des détaillants.

Ce constat est étayé par les éléments d'analyse suivants :

- Le comportement du système pour les deux procédures d'allocation est quasiment le même (sans doute à cause de la tendance du système à satisfaire la totalité des demandes).
- Le taux de transshipment augmente avec l'augmentation de la variation de la demande σ_i ainsi qu'avec l'augmentation du délai L .
- Nous pouvons en déduire que l'augmentation du coût total est due principalement à l'augmentation du coût total de possession. Cet élément confirme la prépondérance du poids de l'effet du coût de possession très faible relativement aux coûts de rupture et de transshipment. Sachant que le coût total des commandes (avec coût K constant) est resté presque le même.

		Détaillants				Centre de distribution			Système
		% β^a	\bar{s}	\bar{S}	%TR	%TS	s	S	E(CT)
PA 1									
$\sigma_i=10$	L=1	99,66	97,5	181,5	2,82	99,16	584	730	32 753,25 €
$\sigma_i=10$	L=3	99,69	176	261	3,07	99,28	589	733	33 390,68 €
%Diff		0,03	80,51	43,80	0,12	0,86	0,41	1,95	8,64
$\sigma_i=20$	L=1	99,53	106	193	4,01	99,29	647	804	36 870,46 €
$\sigma_i=20$	L=3	99,36	204	294	4,97	98,7	635	874	38 764,61 €
%Diff		-0,17	92,45	52,33	-0,59	-1,85	8,71	5,14	23,96
PA 2									
$\sigma_i=10$	L=1	99,62	93,5	177,5	2,96	99,23	587	733	32 685,01 €
$\sigma_i=10$	L=3	99,65	176	261	3,27	99,17	585	729	33 330,46 €
%Diff		0,03	88,24	47,04	-0,06	-0,34	-0,55	1,97	10,23
$\sigma_i=20$	L=1	99,54	107	194	3,85	99,26	645	802	36 818,36 €
$\sigma_i=20$	L=3	99,37	206	296	4,72	98,53	632	870	38 716,29 €
%Diff		-0,17	92,52	52,58	-0,74	-2,02	8,48	5,15	22,63

$\mu_i = 40$, $L_{CD}=5$, $ct=20$, $ch=ch'=1$, $cp=100$, $K=100$, $K'=500$

Tableau 6.3. Comparaison des performances pour $L=1$ vs. $L=3$

6.3.13 Impact de l'écart type de la demande

Dans un premier temps, nous considérons un système de stock à détaillants identiques et nous étudions sa sensibilité vis-à-vis de l'augmentation de l'écart type de la demande. Dans un deuxième temps, nous comparons le comportement de ce système à celui d'un système de stock à détaillants différents en écarts types.

Nous avons expérimenté notre modèle pour différentes combinaisons de délais L (1 et 3) et L_{CD} (2 et 5) et pour chacune des procédures d'allocation PA 1 et PA 2. Nous avons maintenu les autres paramètres constants $\mu_i = 40$, $ct = 20$, $ch = ch' = 1$, $cp = 100$, $K = 100$, $K' = 500$. Les résultats de simulation sont rapportés dans les tableaux 6.4 et 6.5, respectivement pour les procédures PA 1 et PA 2. Ces résultats confirment et complètent ceux déjà analysés dans les deux paragraphes précédents :

- Avec la prépondérance de l'effet du faible coût de possession relativement aux coûts de rupture et de transshipment et pour un coût de commande constant, la minimisation du coût total a tendance à trouver ses solutions dans la satisfaction totale des demandes clients. La gestion de stock chez les détaillants est concentrée sur la satisfaction des demandes clients tenant compte du délai d'approvisionnement L , tandis que la gestion de stock chez le centre de distribution est concentrée sur la satisfaction des commandes détaillants et sur la compensation du délai d'approvisionnement L_{CD} .
- Les deux échelons, détaillants et centre de distribution, sont sensibles à l'augmentation de l'écart type. Le centre de distribution est particulièrement sensible à l'augmentation de l'écart type avec le cumul de l'augmentation de délais L et L_{CD} .
- L'augmentation de l'écart type induit une augmentation du taux de transshipment. Nous constatons aussi que le déséquilibre de l'écart type entre les deux détaillants a un effet sensible sur l'augmentation du taux de transshipment.
- Enfin, dans ce contexte de satisfaction totale des demandes clients, les comportements des deux procédures d'allocation marquent très peu de différence.

	Détaillants				Centre de distribution			Système
	% β^a	\bar{s}	\bar{S}	%TR	%TS	s	S	E(CT)
	L=1, L _{CD} =2							
$\sigma_i=10$ (SS)	99,72	94	178	2,97	99,17	337	495	30 819,04 €
$\sigma_i=20$ (SS)	99,56	107	194	4,34	99,15	366	541	34 197,05 €
$\sigma_1=10, \sigma_2=20$ (SA)	99,58	93	178,5	4,32	99,37	357	527	32 591,41 €
L=1, L _{CD} =5								
$\sigma_i=10$ (SS)	99,66	97,5	181,5	2,82	99,16	584	730	32 753,25 €
$\sigma_i=20$ (SS)	99,53	106	193	4,01	99,29	647	804	36 870,46 €
$\sigma_1=10, \sigma_2=20$ (SA)	99,78	98,5	184	3,56	99,88	627	778	35 119,07 €
L=3, L _{CD} =5								
$\sigma_i=10$ (SS)	99,7	176	261	3,07	99,27	589	733	33 390,68 €
$\sigma_i=20$ (SS)	99,37	204	294	4,97	98,72	635	874	38 764,61 €
$\sigma_1=10, \sigma_2=20$ (SA)	99,7	177	267	4,78	99,82	642	824	38 994,82 €

$\mu_i = 40, ct=20, ch=ch'=1, cp=100, K=100, K'=500$

SS= Système symétrique en écarts types, SA= Système asymétrique en écarts types

Tableau 6.4. Comparaison des performances de PA 1 en fonction de l'écart type σ_i

	Détaillants				Centre de distribution			Système
	% β^a	\bar{s}	\bar{S}	%TR	%TS	s	S	E(CT)
	L=1, L _{CD} =2							
$\sigma_i=10$ (SS)	99,58	94	178	3,43	99,02	337	495	30 934,44 €
$\sigma_i=20$ (SS)	99,71	105	192	4,14	99,24	367	545	34 184,63 €
$\sigma_1=10, \sigma_2=20$ (SA)	99,63	95,5	181	3,81	99,36	355	527	32 624,56 €
L=1, L _{CD} =5								
$\sigma_i=10$ (SS)	99,62	93,5	177,5	2,96	99,23	587	733	32 685,01 €
$\sigma_i=20$ (SS)	99,54	107	194	3,85	99,26	645	802	36 818,36 €
$\sigma_1=10, \sigma_2=20$ (SA)	99,57	98	183,5	3,66	99,33	625	774	34 953,00 €
L=3, L _{CD} =5								
$\sigma_i=10$ (SS)	99,65	176	261	3,27	99,17	585	729	33 330,46 €
$\sigma_i=20$ (SS)	99,37	208,5	298,5	4,72	98,53	632	870	38 716,29 €
$\sigma_1=10, \sigma_2=20$ (SA)	99,7	177	267	4,72	99,82	642	824	38 878,43 €

$\mu_i = 40, ct=20, ch=ch'=1, cp=100, K=100, K'=500$

SS= Système symétrique en écarts types, SA= Système asymétrique en écarts types

Tableau 6.5. Comparaison des performances de PA 2 en fonction de l'écart type σ_i

6.3.2 Étude du système de stock multi échelons sous contrainte de taux de service

Dans cette section, nous étudions les problèmes d'optimisation 2 et 3 se rapportent à la minimisation du coût total du système, sans coût de rupture mais avec contrainte de taux de service.

Il nous faut mentionner, ici, que Diks et De Kok (Diks et De Kok 96) ont étudié un système de stock multi échelons sous contrainte de service, en adoptant la politique (R, S) aussi bien pour le centre de distribution que pour les détaillants, et la politique de transshipment préventif (équilibrage de stocks à chaque période). Ils ont proposé une politique efficace d'allocation au niveau du centre de distribution sous des hypothèses restrictives : les détaillants et le centre de distribution ont la même période de révision et le délai d'approvisionnement entre le centre de distribution et les détaillants est égal à la période de révision. Ils ont indiqué que l'analyse d'un tel système devient très compliquée lorsque ces hypothèses sont relaxées. Dans notre modèle, nous avons adopté la politique de gestion (R, s, S) pour le centre de distribution et la politique (R, s, s+Q_p) pour les détaillants. D'un autre côté, nous avons relaxé les hypothèses sur la période de révision et les délais d'approvisionnement : nous avons considéré que la période de révision R des détaillants et celle R' du centre de distribution peuvent être différentes, de même que le délai entre centre de distribution et détaillants peut être égal à la période de révision ou différent (trois périodes). Pour le transshipment, nous avons adopté la politique d'urgence, à savoir la politique du complete pooling standard. Ainsi, nous sommes dans un contexte bien plus compliqué pour être solvable analytiquement.

Ce travail a été publié dans (Tlili et al. 10a).

6.3.2.1 Systèmes de stock sous contrainte d'un taux de service global du système

Nous considérons, ici, le problème d'optimisation 2. Nous avons expérimenté toutes les combinaisons de $\sigma_i=10$ ou 20, $L=1$ ou 3, $L_{CD}=2$ ou 5. Pour les autres paramètres, nous avons maintenu les valeurs suivantes : $\mu_i=40$, $ct=20$, $ch=ch'=1$, $K=100$, $K'=500$, $R=1$, $R'=2$. Les résultats de la simulation pour les deux procédures d'allocation sont présentés dans les tableaux 6.6 et 6.7.

Encore une fois, nous avons des résultats qui confirment et complètent les précédents :

- Pour un écart type faible de la demande ($\sigma_i=10$) et des délais d'approvisionnement courts ($L=1$, $L_{CD}=2$), la satisfaction des demandes clients est supportée principalement par les stocks des détaillants avec un recours relativement faible au transshipment.
- Une relaxation de SD à 95 puis à 90 diminue de l'importance des stocks de sécurité. Par conséquent, elle fait abaisser les seuils aussi bien chez les détaillants que chez le centre de distribution et amène, par là, une réduction des coûts. Cependant, la loi de la demande restant la même, les situations de rupture aussi bien chez les détaillants que chez le centre de distribution augmentent et sont résolues par un recours plus fréquent au transshipment. Ce dernier constat est général pour toutes les combinaisons (σ_i , L , L_{CD}) testées.

- L'augmentation du délai d'approvisionnement du centre de distribution est supportée principalement par l'augmentation du stock dans le centre, avec une faible répercussion sur l'augmentation des seuils chez les détaillants. Il s'ensuit bien évidemment une augmentation des coûts.
- Par contre, l'augmentation du délai d'approvisionnement des détaillants est supportée quasi-entièrement par une augmentation de stocks chez ces derniers et, éventuellement, une légère baisse de stock chez le centre de distribution.
- Enfin, quelle que soit la combinaison considérée, l'augmentation de l'écart type de la demande se traduit par une augmentation des stocks chez les détaillants avec une répercussion légèrement moins sensible chez le centre de distribution.

SD	Détaillants				Centre de distribution			Système
	%β ^a	\bar{s}	\bar{S}	%TR	%TS	s	S	E(CT)
σ_i=10, L=1, L_{CD}=2								
99	99,02	79	163	8,61	99,05	340	492	27 763,59 €
95	95,08	68,5	152,5	21,03	98,13	292	462	24 764,26 €
90	90,00	59,5	143,5	31,19	97,62	269	441	22 893,31 €
σ_i=10, L=1, L_{CD}=5								
99	99,08	80,5	164,5	6,86	99,11	579	729	29 416,64 €
95	95,02	75,5	159,5	18,84	97,74	540	685	26 674,15 €
90	90,00	61	145	28,1	97,55	500	679	25 306,96 €
σ_i=10, L=3, L_{CD}=5								
99	98,99	169	254	7,02	98,68	560	711	30 182,98 €
95	95,08	168	253	16,56	96,5	495	669	27 053,70 €
90	90,08	150,5	235,5	26,35	96,05	471	644	25 045,28 €
σ_i=20, L=1, L_{CD}=2								
99	99,00	96	183	7,99	98,9	361	529	30 435,94 €
95	95,08	86	173	18,74	97,66	314	490	26 903,73 €
90	90,00	71	158	27,76	97,28	293	473	24 836,53 €
σ_i=20, L=1, L_{CD}=5								
99	99,03	93,5	180,5	7,5	99,16	624	796	33 112,83 €
95	95,05	78,5	165,5	19,48	98,21	580	748	29 435,79 €
90	90,09	74,5	161,5	26,05	97,19	533	712	27 238,46 €
σ_i=20, L=3, L_{CD}=5								
99	99,05	198,5	288,5	6,35	98,55	616	773	34 245,30 €
95	95,00	176	266	17,76	97,15	557	719	29 490,13 €
90	90,00	152	242	27,33	96,74	509	690	26 910,57 €

μ_i =40, ct=20, ch=ch'=1, K=100, K'=500

Tableau 6.6. Résultats numériques du problème d'optimisation 2 sous la procédure d'allocation PA 1 avec contrainte d'un taux de service global

SD	Détailants				Centre de distribution			Système
	$\% \beta^a$	\bar{s}	\bar{S}	%TR	%TS	s	S	E(CT)
$\sigma_i=10, L=1, L_{CD}=2$								
99	98,94	77,5	161,5	9,29	99,14	344	495	27 767,35 €
95	94,96	65	149	23,36	98,39	296	466	24 718,48 €
90	89,97	70	154	28,45	96,87	262	435	22 902,51 €
$\sigma_i=10, L=1, L_{CD}=5$								
99	98,95	80,5	164,5	6,73	99,09	582	728	29 456,48 €
95	95,08	66,5	150,5	19,54	98,31	530	699	26 682,30 €
90	90,01	66	150	27,79	97,18	493	668	25 140,42 €
$\sigma_i=10, L=3, L_{CD}=5$								
99	98,99	169,5	254,5	6,81	98,67	557	711	30 205,96 €
95	95,02	161,5	246,5	17,34	96,98	504	672	27 098,22 €
90	89,95	150,5	235,5	26,3	96,06	471	644	25 054,06 €
$\sigma_i=20, L=1, L_{CD}=2$								
99	99,00	95,5	182,5	7,9	98,92	362	529	30 423,72 €
95	94,99	86	173	18,8	97,65	325	488	26 927,48 €
90	90,00	71,5	158,5	27,9	97,26	296	470	24 855,12 €
$\sigma_i=20, L=1, L_{CD}=5$								
99	98,98	92	179	7,71	99,2	624	798	33 100,09 €
95	95,03	83	170	17,21	98,03	569	745	29 468,59 €
90	90,04	83	170	24,28	96,73	526	705	27 391,08 €
$\sigma_i=20, L=3, L_{CD}=5$								
99	99,05	194	284	6,49	98,77	627	780	34 435,72 €
95	95,06	169	259	18,01	97,61	553	732	29 775,50 €
90	90,00	169,5	259,5	25,46	95,53	497	677	26 925,68 €

$$\mu_i = 40, ct = 20, ch = ch' = 1, K = 100, K' = 500$$

Tableau 6.7. Résultats numériques du problème d'optimisation 2 sous la procédure d'allocation PA 2 avec contrainte d'un taux de service global

Quant à l'impact des procédures d'allocation PA 1 et PA 2, l'analyse comparative des résultats de simulation révèle deux enseignements principaux sans pour autant permettre de déduire des arguments clairs en faveur de l'une ou de l'autre des deux procédures d'allocation :

- Pour un seuil de service minimum SD=99%, la procédure PA 2, en affectant les stocks aux détaillants de façon proportionnelle à la commande, favorise l'écoulement direct vers les clients. Il en résulte une meilleure optimisation du stock chez les détaillants et, par conséquent, une légère amélioration du taux de service avec une légère réduction du coût unitaire. Ceci reste vrai pour SD=95%.
- Par contre, avec un taux de service relaxé SD=90%, l'affectation à la proportionnelle devient une contrainte qui réduit le taux de service global tout en augmentant légèrement le coût unitaire.

6.3.22 Système de stock à taux de service global vs. système de stock à taux de service spécifique à chaque détaillant

Nous voulons examiner l'effet du degré de l'exigence du taux de service en comparant les résultats de la résolution du problème d'optimisation 2 (i.e. taux de service global) à ceux de la résolution du problème d'optimisation 3 (i.e. taux de service spécifique à chaque détaillant). Les résultats de simulation, pour les deux procédures d'allocation, sont exposés dans les tableaux 6.8 et 6.9.

	Détaillants			Centre de distribution			Système
	\bar{s}	\bar{S}	%TR	%TS	s	S	E(CT)
	$\sigma_i=10, L=1, L_{CD}=2$						
SD₁=SD₂=99	80,5	164,5	7,76	98,99	340	489	27 799,29 €
SD₁=SD₂=95	73	157	19,64	97,86	286	459	24 783,44 €
SD₁=SD₂=90	56,5	140,5	30,05	97,84	271	444	22 987,44 €
	$\sigma_i=10, L=1, L_{CD}=5$						
SD₁=SD₂=99	86	170	6,65	98,82	585	718	29 456,46 €
SD₁=SD₂=95	70,5	154,5	19,54	98,06	556	690	26 760,69 €
SD₁=SD₂=90	66	150	27,83	97,17	493	668	25 376,90 €
	$\sigma_i=10, L=3, L_{CD}=5$						
SD₁=SD₂=99	170	255	6,61	98,67	559	708	30 277,41 €
SD₁=SD₂=95	168	253	15,98	96,70	505	666	27 229,23 €
SD₁=SD₂=90	166,5	251,5	23,89	94,98	462	636	25 192,22 €
	$\sigma_i=20, L=1, L_{CD}=2$						
SD₁=SD₂=99	96,5	183,5	8,03	98,86	351	530	30 460,00 €
SD₁=SD₂=95	75	162	19,56	98,36	326	506	27 166,02 €
SD₁=SD₂=90	73	160	27,51	97,17	293	470	24 939,95 €
	$\sigma_i=20, L=1, L_{CD}=5$						
SD₁=SD₂=99	103	190	6,35	98,87	608	784	33 198,52 €
SD₁=SD₂=95	97	184	16,35	97,20	566	724	29 831,00 €
SD₁=SD₂=90	83	170	24,32	96,75	527	705	27 413,63 €
	$\sigma_i=20, L=3, L_{CD}=5$						
SD₁=SD₂=99	202,5	289,5	6,44	98,29	608	759	34 283,17 €
SD₁=SD₂=95	186	273	16,85	96,50	535	706	29 543,28 €
SD₁=SD₂=90	171	261	25,13	95,51	501	676	27 025,76 €

$\mu_i = 40, ct = 20, ch = ch' = 1, K = 100, K' = 500$

Tableau 6.8. Résultats numériques du problème d'optimisation 3 sous la procédure d'allocation PA 1 avec taux de service minimum spécifique à chaque détaillant

- Nous constatons que l'exigence d'un taux de service minimum spécifique à chaque détaillant est subie comme une contrainte plus forte par rapport à l'exigence d'un taux de service minimum global, notamment quand les taux exigés sont élevés (SD₁=SD₂=99). La prise en compte de cette contrainte conduit à une augmentation des prévisions de stock chez les détaillants et une légère augmentation des coûts unitaires. Cette augmentation s'accroît avec l'élargissement de l'écart type.

- La relaxation de ces taux ($SD_1=SD_2=90$) réduit l'effet de cette contrainte et finit par biaiser le comportement du système. En effet les besoins en prévisions de stocks deviennent plus faibles et l'optimisation économique reprend le dessus pour stabiliser le taux de service effectif à la valeur optimale.
- La sensibilité du comportement du système sous la procédure PA 1 est plus forte que sous la procédure PA 2. Vraisemblablement, l'allocation des stocks de façon proportionnelle à la demande est de nature à réduire l'effet de la contrainte induite par l'exigence d'un taux de service spécifique à chaque détaillant.

	Détaillants			Centre de distribution			Système
	\bar{s}	\bar{S}	%TR	%TS	s	S	E(CT)
	$\sigma_i=10, L=1, L_{CD}=2$						
SD₁=SD₂=99	89	173	7,11	98,54	307	481	27 778,89 €
SD₁=SD₂=95	77,5	161,5	18,81	97,64	282	455	24 815,72 €
SD₁=SD₂=90	70	154	28,31	96,91	263	435	22 968,69 €
	$\sigma_i=10, L=1, L_{CD}=5$						
SD₁=SD₂=99	81	165	6,61	99,08	591	727	29 497,86 €
SD₁=SD₂=95	66,5	150,5	19,55	98,33	535	698	26 699,59 €
SD₁=SD₂=90	67	151	27,94	97,12	492	665	25 194,87 €
	$\sigma_i=10, L=3, L_{CD}=5$						
SD₁=SD₂=99	172	257	6,61	98,55	560	708	30 252,76 €
SD₁=SD₂=95	165	250	16,33	96,78	499	671	27 124,10 €
SD₁=SD₂=90	151	236	26,34	96,10	475	642	25 104,92 €
	$\sigma_i=20, L=1, L_{CD}=2$						
SD₁=SD₂=99	96	183	7,78	98,90	355	529	30 569,00 €
SD₁=SD₂=95	86	173	18,72	97,68	331	488	26 983,75 €
SD₁=SD₂=90	70,5	157,5	27,73	97,42	316	471	25 166,75 €
	$\sigma_i=20, L=1, L_{CD}=5$						
SD₁=SD₂=99	93	180	7,31	99,21	632	798	33 216,21 €
SD₁=SD₂=95	81,5	168,5	17,25	98,15	578	747	29 571,44 €
SD₁=SD₂=90	81,5	168,5	24,55	96,81	527	707	27 493,44 €
	$\sigma_i=20, L=3, L_{CD}=5$						
SD₁=SD₂=99	196,5	286,5	6,71	98,55	626	770	34 670,06 €
SD₁=SD₂=95	171	261	17,84	97,43	546	730	29 900,25 €
SD₁=SD₂=90	171	261	25,18	95,48	499	676	26 990,02 €

$\mu_i = 40, ct = 20, ch = ch' = 1, K = 100, K' = 500$

Tableau 6.9. Résultats numériques du problème d'optimisation 3 sous la procédure d'allocation PA 2 avec taux de service minimum spécifique à chaque détaillant

6.3.3 Évaluation des solutions initiales

Le tableau 6.10 récapitule les résultats de la simulation pour le problème d'optimisation 1, concernant les seuils de stock chez le centre de distribution et chez les détaillants ainsi que les valeurs calculées pour les bornes inférieures et les solutions initiales (bornes supérieures).

Nous voyons que le point de commande du centre de distribution ainsi que le point de commande des détaillants obtenus par le modèle de simulation-optimisation se situent juste au dessous des bornes supérieures s^0 et s_i^0 et, donc, loin des bornes inférieures LB_{w1} et LB_i . Les marges entre ces solutions deviennent plus larges avec l'augmentation des délais (L et L_{CD}) et de l'écart type. Ceci indique que le comportement coopératif du transshipment se manifeste de façon plus significative quand les délais d'approvisionnement sont longs et lorsque la variation de la demande est élevée.

En outre, le niveau de reapprovisionnement du centre de distribution obtenu par la simulation se trouve presque au milieu de l'intervalle $[LB_{w2}, S^0]$.

	Solutions obtenues par la simulation				Solutions initiales							
	Centre de distribution		Détaillants		Centre de distribution				Détaillants			
	s	S	\bar{s}	\bar{S}	LB_{w1}	s^0	LB_{w2}	S^0	LB_i	s_i^0	S_i^0	
$\sigma_i=10, L=1, L_{CD}=2$	337	495	94	178	160	367	240	680	40	96	180	
$\sigma_i=10, L=1, L_{CD}=5$	598	728	94,5	178,5	400	607	480	920	40	96	180	
$\sigma_i=10, L=3, L_{CD}=5$	589	733	176	261	400	626	640	1102	120	186	271	
$\sigma_i=20, L=1, L_{CD}=2$	366	541	107	194	160	413	240	748	40	127	214	
$\sigma_i=20, L=1, L_{CD}=5$	647	804	106	193	400	653	480	988	40	127	214	
$\sigma_i=20, L=3, L_{CD}=5$	635	874	204	294	400	692	640	1208	120	234	324	

$\mu_i = 40, ct = 20, ch = ch' = 1, K = 100, K' = 500$

Tableau 6.10. Comparaison des solutions initiales à celles obtenues par la simulation pour le problème d'optimisation 1

Les résultats de simulation pour le problème d'optimisation 2 sont rapportés dans les tableaux 6.11 et 6.12. Nous voyons que, pour des délais d'approvisionnement courts et un taux de service élevé, le point de commande du centre de distribution et le point de commande des détaillants se trouvent proches des bornes supérieures s^0 et s_i^0 . Ceci montre que, dans ce contexte, le transshipment présente un comportement moins coopératif et que les détaillants comptent principalement sur leur stock pour la satisfaction totale des demandes clients. Par contre, l'intérêt du transshipment est apprécié face à des longs délais d'approvisionnement (L et L_{CD}) ainsi qu'avec une variation élevée de la demande. Dans ce cas, les seuils de stock obtenus par le modèle de simulation-optimisation s'écartent de façon plus sensible des bornes supérieures.

Ces constats se confirment également pour le problème d'optimisation 3.

	SD	Centre de distribution					
		Solutions obtenues par la simulation		Solution initiale			
		s	S	LB _{w1}	s ⁰	LB _{w2}	S ⁰
$\sigma_i = 10, L=1, L_{CD}=2$	99	345	495	160	353	240	520
	95	292	462	160	325	240	494
	90	283	447	160	308	240	476
$\sigma_i = 10, L=1, L_{CD}=5$	99	579	729	400	603	480	760
	95	558	697	400	567	480	734
	90	508	680	400	544	480	716
$\sigma_i = 10, L=3, L_{CD}=5$	99	566	714	400	610	640	944
	95	500	666	400	576	640	906
	90	472	644	400	554	640	884
$\sigma_i = 20, L=1, L_{CD}=2$	99	376	530	160	403	240	578
	95	350	505	160	356	240	530
	90	292	476	160	328	240	502
$\sigma_i = 20, L=1, L_{CD}=5$	99	621	798	400	670	480	818
	95	554	759	400	607	480	770
	90	533	712	400	570	480	742
$\sigma_i = 20, L=3, L_{CD}=5$	99	616	773	400	680	640	1028
	95	557	719	400	621	640	964
	90	509	690	400	585	640	928

$\mu_i = 40, ct=20, ch=ch'=1, K=100, K'=500$

Tableau 6.11. Comparaison des solutions initiales à celles obtenues par la simulation pour le centre de distribution (problème d'optimisation 2)

	SD	Q _p	Détailants				
			Solutions obtenues par la simulation		Solution initiale		
			\bar{s}	\bar{S}	LB _i	s _i ⁰	S _i ⁰
$\sigma_i = 10, L=1, L_{CD}=2$	99	84	79	163	40	96	180
	95	84	68,5	152,5	40	83	167
	90	84	59,5	143,5	40	74	158
$\sigma_i = 10, L=1, L_{CD}=5$	99	84	80,5	164,5	40	96	180
	95	84	75,5	159,5	40	83	167
	90	84	61	145	40	74	158
$\sigma_i = 10, L=3, L_{CD}=5$	99	85	169	254	120	187	272
	95	85	168	253	120	171	256
	90	85	150,5	235,5	120	157	242
$\sigma_i = 20, L=1, L_{CD}=2$	99	87	96	183	40	122	209
	95	87	86	173	40	98	185
	90	87	71	158	40	84	171
$\sigma_i = 20, L=1, L_{CD}=5$	99	87	93,5	180,5	40	122	209
	95	87	78,5	165,5	40	98	185
	90	87	74,5	161,5	40	84	171
$\sigma_i = 20, L=3, L_{CD}=5$	99	90	198,5	288,5	120	224	314
	95	90	176	266	120	192	282
	90	90	152	242	120	174	264

$\mu_i = 40, ct=20, ch=ch'=1, K=100, K'=500$

Tableau 6.12. Comparaison des solutions initiales à celles obtenues par la simulation pour les détaillants (problème d'optimisation 2)

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le problème du transshipment dans un réseau de distribution multi échelons où le centre de distribution gère son stock selon la politique de gestion (R', s, S) et les détaillants gèrent leur stock selon la politique (R, s_i, s_i+Q_p) . Nous avons cherché à déterminer les seuils de stock (s, S) chez le centre de distribution et les seuils de stock s_i chez les détaillants qui minimisent le coût total du système et ce pour trois objectifs différents, à savoir : minimisation du coût total, minimisation du coût total sous la contrainte d'un taux de service global et minimisation du coût total sous la contrainte d'un taux de service spécifique à chaque détaillant. D'une façon générale, l'analyse des résultats de la simulation a montré l'apport significatif du transshipment dans les systèmes de stock où l'écart type de la demande est élevé et où le délai du centre de distribution et/ou le délai des détaillants sont plus longs.

En outre, les expérimentations que nous avons effectuées nous ont permis de cerner de près l'incidence des variations des paramètres σ_i , L et L_{CD} sur les performances du système, au niveau de la gestion des stocks chez le centre de distribution, au niveau de la gestion des stocks chez les détaillants et au niveau de la mise en œuvre bénéfique du transshipment. De même, ces expérimentations nous ont permis d'apprécier l'impact de directives particulières, comme les procédures d'affectation des stocks entre les détaillants en cas de pénurie.

De telles expérimentations sont fondamentalement utiles quand elles sont effectuées avec les valeurs précises des paramètres d'un système réel à étudier (délais, coût de rupture, coût de transshipment, coûts de commandes, moyenne et écart type de la demande, etc.).

Conclusion générale

Le pilotage des flux au sein d'un réseau de distribution est fragile à cause du caractère aléatoire des demandes clients. L'analyse en vue d'optimiser son rendement et d'améliorer sa robustesse conduit à étudier des modèles basés sur des représentations probabilistes liées aux demandes clients. Outre les approches développées pour la gestion de stock localement à chaque site, les entreprises s'orientent vers le développement d'approches complémentaires de pilotage des flux, au sein du réseau, basées sur les principes de la coopération et de la collaboration. L'harmonisation de l'ensemble amène à prendre d'importantes décisions (politique et paramètres de gestion des stocks, politique et paramètres de coopération, ...) afin de garantir un taux de satisfaction des demandes clients au moindre coût. Les travaux développés dans cette thèse se situent dans ce contexte et ont cherché à explorer les apports possibles de la mise en œuvre du transshipment d'urgence comme mode de coopération entre les détaillants. Nous nous sommes intéressés particulièrement aux politiques de pilotage de flux tirés par les demandes clients, avec des politiques locales de gestion de stock du type (R, s, S).

Notre objectif est précisément d'extraire le maximum d'enseignements à même d'améliorer aussi bien la performance locale à chaque site que celle plus globale du réseau de distribution et ce, à partir de l'analyse approfondie de solutions liées à l'optimisation des systèmes de stocks avec transshipment, pour diverses structures de réseau de distribution.

En raison de la complexité inhérente à la nature du problème de transshipment, nous avons conduit progressivement notre étude pour trois structures différentes de réseau :

- système de stock à deux échelons et à deux détaillants, avec coût unitaire de transshipment ;
- système de stock à deux échelons et à détaillants multiples, avec coût fixe de transshipment ;
- système de stock multi échelons à deux détaillants, avec coût fixe de transshipment.

Pour chacune de ces structures, nous avons visé à déterminer, sur un horizon fini de périodes, les seuils de stocks (s et S chez les détaillants et chez le centre de distribution) qui minimisent le coût total du système tout en garantissant un taux de service désiré. Dans ce cadre, quatre politiques de transshipment ont été explorées en

cherchant à affiner les stratégies à même d'optimiser les performances par la mise en œuvre du transshipment au sein des réseaux considérés.

Ainsi, nous avons commencé par développer un modèle mathématique traitant le problème du transshipment dans un réseau de distribution à deux échelons et à deux détaillants ayant des paramètres de fonctionnement identiques en délais d'approvisionnement, en écarts types de la demande client et en coûts (commande, possession, rupture et transshipment). Les résultats issus de ce modèle ont permis de cerner les contextes dans lesquels la transformation d'un système sans transshipment en un système avec transshipment d'urgence présente des opportunités pour l'amélioration du taux de service client et la réduction des seuils de stock et, donc, du coût total du système. Néanmoins, la nature de cette modélisation impose l'adoption d'hypothèses restrictives. Pour affiner l'analyse, nous nous sommes orientés vers le développement de modèles basés sur la simulation-optimisation. Les expérimentations de ces modèles nous ont permis de tester de façon fine différentes combinaisons des paramètres de fonctionnement. Nous avons ensuite reproduit la même démarche pour l'étude des systèmes relevant des deux autres structures considérées.

Des commentaires détaillés sont donnés dans les conclusions de chaque expérimentation. Nous synthétisons, ici, ceux qui sont liés directement au comportement coopératif du transshipment :

Pour les réseaux de distribution à deux échelons :

- Plus le coût unitaire de transshipment, entre deux détaillants, est réduit au regard du coût unitaire de rupture, plus l'impact de la coopération est important. Ce constat se confirme également pour un système de stock à détaillants multiples et coût fixe par transshipment quel qu'en soit la quantité.
- En testant la sensibilité aux paramètres d'entrée (délai d'approvisionnement, écart type de la demande et nombre des détaillants), nous avons relevé que, d'une façon générale, l'intérêt du transshipment est surtout important dans les grands systèmes de distribution (i.e. à grand nombre de détaillants) et dans les systèmes de stock à délais d'approvisionnement longs et/ou à écarts types élevés.
- Pour ce qui est de la sensibilité aux paramètres coûts (commande, possession, rupture et transshipment), nous avons relevé que l'augmentation du coût de commande et/ou du coût de rupture se compense plus avantageusement par le développement des stocks que par le recours au transshipment. Tandis que l'augmentation du coût de possession et/ou du nombre de détaillants donne de l'intérêt au recours au transshipment.
- Le transshipment est également bénéfique dans un système de stock à délais d'approvisionnement différents.
- Le comportement du modèle de stock avec transshipment dépend fortement du choix de la politique du transshipment. Nous avons exploré quatre politiques différentes, à savoir : la politique du tout ou rien, le complete pooling standard, le complete pooling plafonné et le complete pooling conditionné. Nous avons mis en évidence l'avantage, en pratique, du complete pooling plafonné ; chaque détaillant peut contrôler le degré de coopération (ou mutualisation de son stock) en fixant une capacité maximale de transshipment. Aussi, nous avons montré

l'intérêt du complete pooling conditionné dans lequel chaque détaillant ne s'autorise d'effectuer que les transshipments rentables, comparativement au complete pooling standard dans lequel le transshipment est effectué de façon systématique chaque fois que le stock disponible le permet.

Nous récapitulons, dans le tableau 1, les conditions où le transshipment apporte un bénéfice appréciable (\uparrow) et celles pour lesquelles le bénéfice est limité (\downarrow). Nous avons visé exprès à illustrer le lien direct entre le comportement de certains paramètres d'entrée et celui induit sur le bénéfice du transshipment. Particulièrement, pour la partie se rapportant aux résultats en chapitre 4 (sans transshipment vs. avec transshipment), le symbole (\downarrow) signifie que le fonctionnement avec transshipment systématique quand $ct=cp$ est désavantageux.

	Paramètres										Bénéfice du transshipment
	N	σ_i	L_i	K	ch	cp	ct	ct<cp	SD	Q_{max}	
Chapitre 4 : transshipment (deux détaillants et coût linéaire)	fixe	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	V	fixe	\times	\uparrow
	fixe	fixe	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	V	fixe	\times	\uparrow
	fixe	\uparrow	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	V	fixe	\times	\uparrow
	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\downarrow	fixe	V	fixe	\times	\uparrow
	fixe	\downarrow	\downarrow	fixe	fixe	fixe	fixe	NV	fixe	\times	\downarrow
	fixe	\downarrow	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	NV	fixe	\times	\downarrow
	fixe	\uparrow	\downarrow	fixe	fixe	fixe	fixe	NV	fixe	\times	\uparrow
	fixe	\uparrow	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	NV	fixe	\times	\uparrow
	fixe	fixe	\neq	fixe	fixe	fixe	fixe	V	fixe	\times	\uparrow
	fixe	fixe	\neq	fixe	fixe	fixe	fixe	NV	fixe	\times	\downarrow
Chapitre 5 : transshipment (détaillants multiples et coût fixe)	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\times	\times	\times	\uparrow
	\uparrow	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\times	\times	\times	\uparrow
	\uparrow	fixe	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	\times	\times	\times	\uparrow
	\uparrow	\uparrow	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	\times	\times	\times	\uparrow
	fixe	fixe	fixe	\uparrow	fixe	fixe	fixe	\times	\times	\times	\downarrow
	\uparrow	fixe	fixe	\uparrow	fixe	fixe	fixe	\times	\times	\times	\uparrow
	fixe	fixe	fixe	fixe	\uparrow	fixe	fixe	\times	\times	\times	\uparrow
	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\uparrow	fixe	\times	\times	\times	\downarrow
	fixe	fixe	fixe	\uparrow	\uparrow	fixe	fixe	\times	\times	\times	\uparrow
	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\uparrow	\times	\times	\times	\downarrow
	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\uparrow	\times	\times	\times	\downarrow
	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\times	\uparrow	\times	\downarrow
	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\times	\downarrow	\times	\uparrow
	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\times	\uparrow	\times	\uparrow
	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\times	\downarrow	\times	\uparrow
	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\times	\times	\uparrow	\uparrow
	\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\times	\times	\uparrow	\uparrow
	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\times	\times	\downarrow	\downarrow
\uparrow	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	fixe	\times	\times	\downarrow	\uparrow	

NV : non vérifiée, V : vérifiée, \times : non considéré, N : nombre de détaillants, σ_i : écart type, L_i : délai, K : coût de commande, ch : coût de possession, cp : coût de rupture, ct : coût de transshipment, SD : service désiré, Q_{max} : capacité de transshipment

Tableau 1. Impact des paramètres dans un réseau à deux échelons

Pour le réseau de distribution multi échelons :

- Comme pour le réseau à deux échelons, l'intérêt du transshipment augmente dans les systèmes où l'écart type de la demande est élevé. Les asymétries dans les écarts types favorisent également le recours au transshipment.
- L'intérêt du transshipment est notamment sensible au degré de l'exigence en taux de service minimum. Plus cette exigence est relaxée, plus les besoins en prévisions de stocks peuvent être réduits en comptant sur le recours au transshipment pour couvrir les situations de rupture. Cet appui sur le recours au transshipment est plus fort quand l'exigence du taux de service minimum est spécifiée de façon globale pour tout le système plutôt que de façon précise au niveau de chaque détaillant.
- Il est à noter qu'une exigence relaxée du taux de service minimum laisse plus de liberté au système pour augmenter les stocks et faire intervenir davantage le recours au transshipment quand cela va de paire avec une meilleure optimisation économique.
- Les procédures d'allocation des stocks aux détaillants en cas de pénurie chez le centre de distribution ont aussi leur impact sur le taux du recours au transshipment. Nous avons mis en évidence qu'une politique d'allocation proportionnelle à la commande ponctuelle des détaillants est de nature à améliorer le taux de service et à optimiser les coûts tout en réduisant le recours au transshipment.
- Soulignons encore que, dans tous les cas et au-delà de l'appréciation des incidences au niveau du comportement coopératif du transshipment, la simulation-optimisation des modèles élaborés permet d'étudier la sensibilité des performances générales du système (taux de commandes, niveau des stocks, qualité de service, ...) à la variation de chacun des paramètres de fonctionnement considérés. En même temps, cette expérimentation des modèles permet d'évaluer les coûts et de quantifier le bénéfice économique du transshipment.
- Nous devons reconnaître, ici, que les analyses que nous avons données, sur la base des résultats des différentes expérimentations que nous avons effectuées au cours de nos travaux, restent liées aux valeurs numériques que nous avons assignées aux différents paramètres. De telles analyses seront d'une pertinence et d'un intérêt beaucoup plus potentiels quand elles sont effectuées partant d'expérimentations réalisées pour des configurations de systèmes réels et avec des valeurs numériques qui caractérisent ces systèmes. Les importances relatives des différents coûts seront sûrement déterminantes.

Nous synthétisons, dans le tableau 2, les conditions où le transshipment apporte un bénéfice appréciable (\uparrow) et celles pour lesquelles le bénéfice est limité.

Paramètres						Bénéfice du transshipment
σ_i	L_{CD}	L	SD	SD_i	PA	
fixe	↑	fixe	×	×	∇	↓
fixe	fixe	↑	×	×	∇	↑
↑	fixe	fixe	×	×	∇	↑
≠	fixe	fixe	×	×	∇	↑
fixe	fixe	fixe	↓	×	∇	↑
fixe	fixe	fixe	↑	×	∇	↓

□ : non considéré, σ_i : écart type, L_{CD} : délai du centre de distribution, L : délai des détaillants, SD : service désiré, SD_i : service désiré à chaque détaillant, PA : procédure d'allocation

Tableau 2. Impact des paramètres dans un réseau multi échelons

Perspectives

Différents prolongements de nos travaux, tant sur le plan théorique que sur le plan pratique, peuvent être envisagés au-delà des hypothèses considérées dans ce mémoire.

- Rappelons que l'objectif principal des travaux que nous avons effectués dans cette thèse est de cerner des situations favorables pour instrumenter le transshipment au sein des réseaux de distribution. Pour faire le lien avec le dernier commentaire du paragraphe précédent, nous sommes appelés à confirmer nos résultats par la simulation de systèmes existants, avec des paramètres d'entrée réels. Dans le même souci, il nous faut travailler à repousser deux limitations substantielles :
 - La première limitation est issue de la simulation. En effet, en adoptant parfois certains choix particuliers comme, par exemples, celui des coûts constants pour les commandes ou pour les transshipments (indépendamment des quantités) ainsi que celui de la politique $(R, s, s+Q_p)$, nous avons visé à varier nos expérimentations en même temps qu'à réduire les temps nécessaires pour approcher une résolution acceptable par la simulation. Or, il est évident que de telles "simplifications", si elles s'écartent sensiblement des caractéristiques des systèmes réels étudiés, peuvent biaiser les résultats des analyses effectuées. Dans le cas d'une expérimentation sur des systèmes réels, pour lesquels la précision des résultats est essentielle, il devient nécessaire de faire évoluer la simulation de façon à coller le plus possible aux détails des paramètres de fonctionnement sous test.
 - La deuxième limitation est liée à la complexité de la prise en compte de la contrainte d'un taux de service désiré. En effet, cette contrainte est traitée, par nos modèles actuels, plutôt comme l'exigence d'un taux de service minimum. Dans ce sens que la valeur du taux réalisé effectivement ne peut pas être contrôlée au cours de la simulation des différentes périodes de l'horizon considéré, mais seulement prélevée et testée à la fin d'une simulation ayant pour objectif principal l'optimisation du coût total du système.
- De même, l'étude des systèmes de stock multi échelons gagnerait à ce que l'on approfondisse les règles de réalisation des transshipments selon l'ordre de proximité géographique des détaillants et leur stock disponible.
- D'une façon générale, il nous paraît fondamental de lier l'étude des apports du transshipment à celle des politiques complémentaires qui interviennent dans

l'optimisation économique, comme le conditionnement du transshipment ou l'allocation des stocks en cas de pénurie.

- Enfin, il pourrait être intéressant d'étudier l'impact du transshipment dans les systèmes où les demandes, qui n'ont pu être satisfaites dans la période t où elles ont été enregistrées, pourront être maintenues et considérées comme non perdues sous condition qu'elles soient satisfaites en priorité dans la période qui suit.

Nous pouvons ajouter d'autres axes de recherche proposés par Paterson et al. (Paterson et al. 11) et Chiou (Chiou 08) qui sont liés au transshipment d'urgence :

- la prise en compte de temps de transshipment non négligeables ; c'est une hypothèse qui s'approche du cas réel industriel ;
- la possibilité d'avoir des temps de transshipment différents avec des coûts différents ;
- l'intégration de l'optimisation des paramètres du transshipment dans le problème global de l'optimisation de différentes politiques de gestion de stock ;
- la prise en compte de la limite de l'espace de stockage et de la capacité des sources ;
- la considération des produits multiples dans le réseau de distribution.

Le logiciel Crystal Ball

1. Présentation sommaire

Nous avons utilisé le logiciel «Crystal Ball Professional Edition 7.2®» qui s'interface directement avec le tableur Excel 2003. Ce logiciel est destiné à résoudre des problèmes incertains complexes et servir comme outil d'aide à la décision (Gentry et al. 05a-05b). Dans sa version complète, il intègre plusieurs outils d'analyse. Nous nous limitons, ici, à présenter la simulation de Monte Carlo et l'outil d'optimisation OptQuest, puisque la résolution de notre problématique s'est basée sur le couplage de ces deux outils. Plusieurs travaux de recherche ayant traité de problèmes proches du notre se sont basés sur la résolution par simulation-optimisation ; nous pouvons citer : (Tagaras et Chen 92) ; (Fu et Healy 97) ; (Xu 97) ; (Evans et Olson 98) ; (Needham et Evers 98) ; (Tagaras 99) ; (Evans 00) ; (Rao et al. 03) ; (Xu et al. 03) ; (Herer et al. 04) ; (Kurkereja et Schmidt 05) ; (Satyendra et Venkata 05) ; (Özdemir et al. 06) ; (Kleijnen et Wan 07) ; (Zabawa et Mielczareck 07) ; (Ekren et Heragu 08). Plus précisément, la méthodologie de résolution adoptée dans les travaux de Rao et al., Kleijnen et Wan, Zabawa et Mielczareck et Ekren et Heragu, est la plus proche de la notre. Ces travaux ont couplé la simulation et l'OptQuest du logiciel ARENA ®. Les travaux (Evans et Olson 98) et (Evans 00) ont traité le problème de gestion de stock (s, Q) d'un seul site sur un horizon de 52 périodes en considérant comme points de départ de la simulation, un point de commande s égal à la demande durant le délai d'approvisionnement et pour Q la quantité de commande de Wilson. Pour déterminer s et Q , ils ont utilisé la simulation de Monte Carlo et l'OptQuest de Crystal Ball ®.

Toutes les méthodes pratiques basées simulation-optimisation sont des heuristiques fondées sur un processus itératif. L'OptQuest traite le modèle de simulation comme une boîte noire ; autrement dit, il observe seulement les entrées-sorties du modèle de simulation (cf. Figure 1). Ainsi, il y a une séparation complète entre le modèle de simulation et la procédure d'optimisation. Le processus itératif (simulation-optimisation) de recherche d'une meilleure solution se poursuit jusqu'à ce que l'OptQuest atteigne un critère de limite de temps d'exécution ou de nombre maximum de simulations. La procédure de l'OptQuest est illustrée en figure 2.

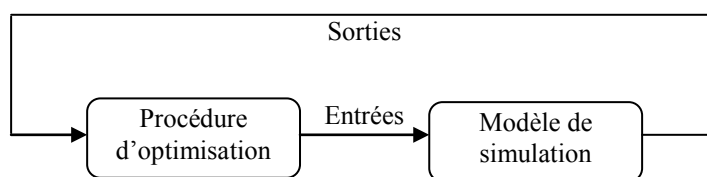


Figure 1. Coordination entre l'optimisation et la simulation (Glover et al. 98)

La simulation de Monte Carlo a consisté à générer, en plusieurs essais, des valeurs aléatoires pour des variables incertaines définies selon des distributions probabilistes (Goldman et al. 03 ; Dirk 07). Pour chaque essai de la simulation, Crystal Ball répète les trois étapes suivantes (cf. Figure 2) : (1) il génère aléatoirement des valeurs pour les variables incertaines qu'il range dans les cellules d'hypothèse (assumption cells), (2) il calcule entièrement la feuille de calcul (spreadsheet) et (3) il affiche les résultats sous une forme choisie (forecast charts). Le résultat final obtenu (graphiques ou rapport statistique) après la réalisation de la simulation sur le modèle tableur Excel montre l'impact de la variation des variables incertaines sur les paramètres de sortie du système modélisé (Gentry et al. 05a-05b). Nous détaillons, dans la section 3.1, la mise en œuvre de la simulation de Monte Carlo pour notre cas d'étude.

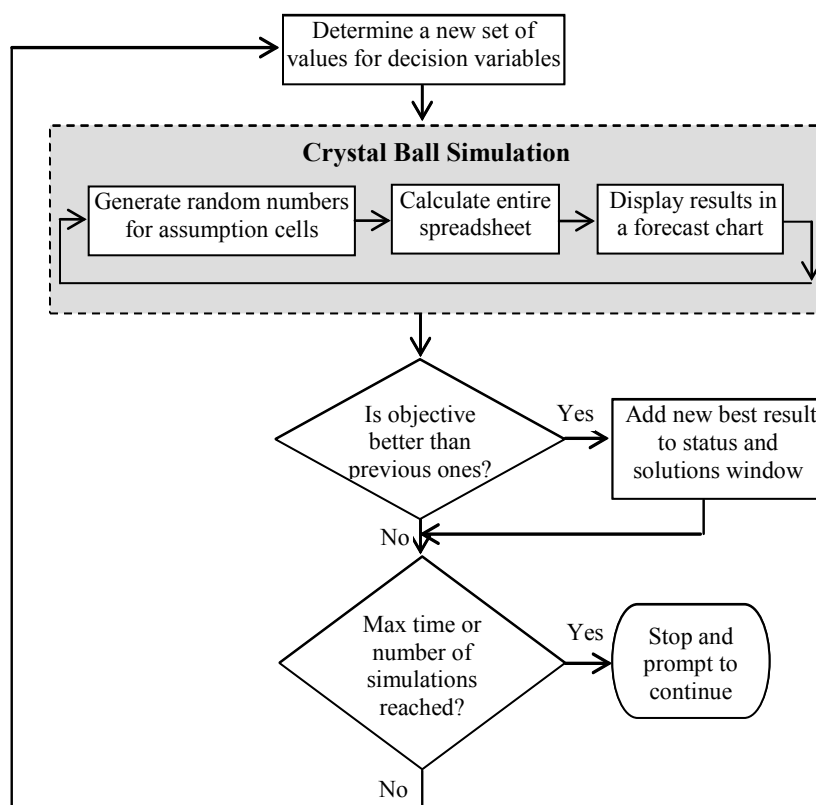


Figure 2. L'organigramme de la procédure du Crystal Ball et de l'OptQuest (Evans et al. 04)

2. L'outil OptQuest 2.3®

L'outil OptQuest est conçu essentiellement pour résoudre les problèmes d'optimisation complexes. Il consiste à chercher les meilleures solutions de décision pour des variables (définies dans des intervalles de valeurs) qui optimisent progressivement, selon le procédé prédéfini, un critère donné soumis éventuellement à un ensemble de contraintes. Ces meilleures solutions peuvent être optimales ou proches de l'optimum.

L'OptQuest combine les méta-heuristiques (recherche tabou, « Scatter Search » et réseau de neurones) dans une seule heuristique de recherche (Glover et al. 98). Pour

des raisons commerciales, l'heuristique exacte de l'OptQuest n'est pas divulguée. Nous présentons dans ce qui suit quelques principes de chacune des heuristiques susmentionnées en nous basant sur (Glover et al. 98 ; Laguna 97).

Recherche tabou : C'est une métaheuristique proposée par (Glover 86). L'idée principale est de passer d'une solution valide à une autre meilleure solution tout en mémorisant les mouvements effectués dans une liste. Ces mouvements deviennent donc interdits (tabous) ce qui permet d'éviter de tomber dans un cycle de mouvements répétitifs et de sortir ainsi des minima locaux. Ceci est le principe général de cette méthode, de nombreuses variantes ont été ajoutées pour améliorer son processus de recherche (Glover et Laguna 93 ; Glover 96) :

- Mémoire à court terme (taille réduite), dite « recency memory », dans laquelle sont stockées les solutions récemment visitées. Elle consiste à éviter les mouvements qui mènent aux solutions ayant des attributs communs avec les solutions incluses dans cette mémoire.
- Mémoire à long terme, dite « frequency memory », dans laquelle sont stockées les solutions visitées durant la recherche. Elle consiste à défavoriser les mouvements menant aux solutions dont les attributs ont été souvent partagés avec les solutions de cette mémoire ou à accepter alternativement des mouvements menant aux solutions dont les attributs ont rarement été rencontrés auparavant.

Scatter search : La recherche par dispersion, ou « Scatter Search » en anglais, a été proposée par Glover (Glover 77) dans le cadre de la résolution de programmes mathématiques en nombres entiers. Tout comme les algorithmes génétiques, elle est basée sur une population de solutions qui évolue dans le temps en utilisant des choix stratégiques et une mémoire adaptative avec des combinaisons linéaires (convexes et non convexes) de solutions pour créer de nouvelles solutions. La figure 3 esquisse l'approche de scatter search sous sa forme originale.

Scatter search procedure.

- 1) Apply heuristic processes to generate a starting set of solution vectors (trial points). Designate a subset of the best vectors to be *reference points*. (Subsequent iterations of this step, transferring from Step 3 below, incorporate advanced starting solutions and best solutions from previous history as candidates for the reference points.)
- 2) Form linear combinations of subsets of the current reference points to create new points. The linear combinations are:
 - chosen to produce points both inside and outside the convex region spanned by the reference points.
 - modified by generalized rounding processes to yield integer values for integer-constrained vector components.
- 3) Extract a collection of the best points generated in Step 2 to be used as starting points for a new application of the heuristic processes of Step 1. Repeat these steps until reaching a specified iteration limit.

Figure 3. Procédure du scatter search (Laguna 97)

Réseau de neurones : c'est un modèle de prévision qui accélère la recherche en évitant les simulations dont les résultats (valeurs de la fonction objectif) sont prévus inférieurs à la valeur actuelle de la fonction objectif (Glover et al. 98 ; Laguna 97).

Nous présentons, dans la section 3.2, l'application de l'OptQuest sur notre cas d'étude.

3. Modèle basé simulation-optimisation pour un système de stock avec transshipment de deux détaillants identiques

Nous exposons, ici, la démarche que nous avons suivie pour implémenter un système de stock avec transshipment de deux détaillants identiques (chapitre 4). Nous rappelons, d'abord, le modèle de simulation correspondant à ce système ensuite nous détaillons le modèle d'optimisation.

3.1 Modèle de simulation

Nous avons suivi les étapes suivantes pour définir le modèle de simulation :

- 1- Établir, sous forme déterministe, un modèle tableur Excel pour un système de stock avec transshipment de deux détaillants identiques.
- 2- Définir les entrées du modèle (cellules d'hypothèse ou assumption cells) pour représenter les variables aléatoires des demandes clients suivant la distribution normale tout en spécifiant la moyenne et l'écart type (cf. Figure 4). Cette étape permet d'exécuter la simulation de Monte Carlo sur ce modèle. Les cellules d'hypothèse sont identiques en distribution et indépendantes entre les détaillants et à travers les périodes (cf. Figure 7, décocher l'option enable correlation).

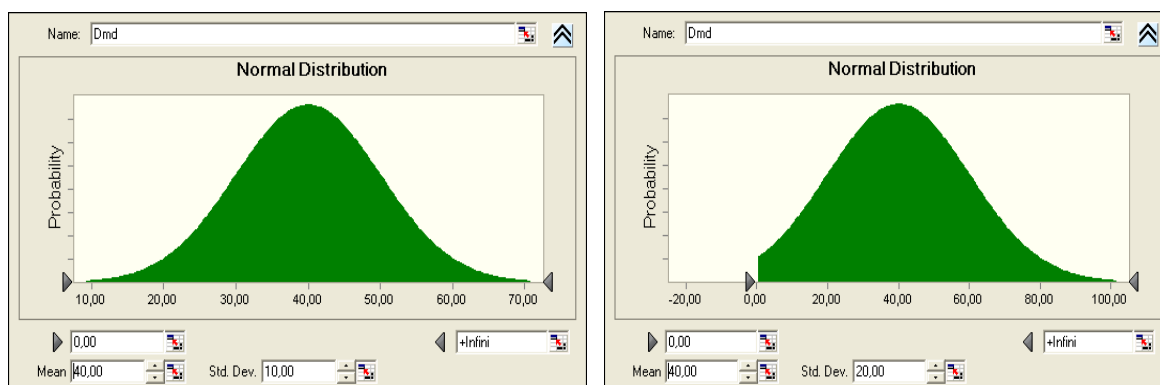


Figure 4. Représentation de deux cas étudiés, dans ce mémoire, pour la distribution normale des demandes clients aléatoires (la demande doit être positive)

- 3- Définir les sorties du modèle (cellules de prévision ou forecast cells) qui représentent les mesures de performance du système de stock : coût total, taux de service, taux de transshipment, etc. (cf. Figure 5).

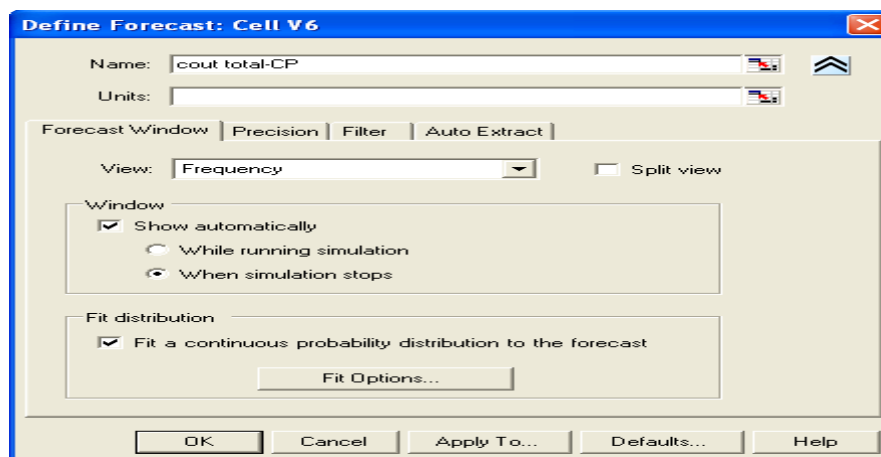


Figure 5. Spécification de la cellule de prévision pour le coût total du système

4- Régler les options pour exécuter la simulation de Monte Carlo :

- i) le nombre d'essais est choisi égal à 500 ; il est prouvé, dans (Gentry et al. 05c), que ce nombre est suffisant pour obtenir des estimations exactes de la valeur moyenne d'une mesure de performance. L'intervalle de confiance est égal à 95% (cf. Figure 6). A la fin de l'exécution de la simulation, Crystal Ball indique, parmi les solutions évaluées, les solutions se situant dans l'intervalle de confiance et celles se trouvant en dehors.
- ii) le générateur de nombres aléatoires est initialisé à la valeur de début « seed » égale à 999 (valeur par défaut). Ceci permet de produire le même ordre des nombres aléatoires chaque fois qu'on exécute la simulation (cf. Figure 7). Crystal Ball utilise le générateur de nombres aléatoires appelé « Multiplicative Congruential Generator » dont la formule est comme suit :

$$r < -(62089911 * r) \bmod (2^{31} - 1)$$
 Selon cette formule itérative, le générateur a une période de longueur $2^{31}-2$ ou 2 147 483 646. Ceci signifie que le cycle des nombres aléatoires se répète après plusieurs milliards d'essais (Gentry et al. 05c).
- iv) choisir le mode d'exécution en vitesse normale parce que le nombre de cellules est important dans notre modèle tableau Excel et les relations de dépendance entre les cellules sont complexes (cf. Figure 7).

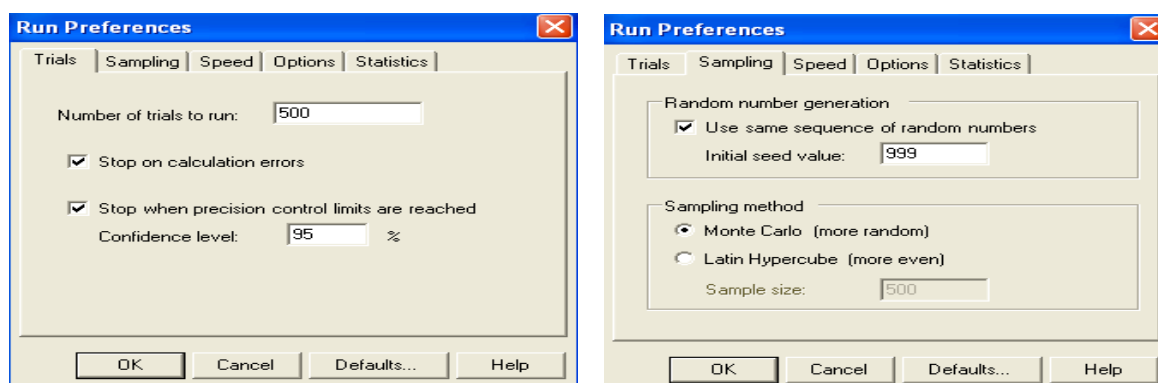


Figure 6. Spécification de nombre d'essais, de l'intervalle de confiance, des paramètres du générateur de nombres aléatoires et de la méthode de simulation

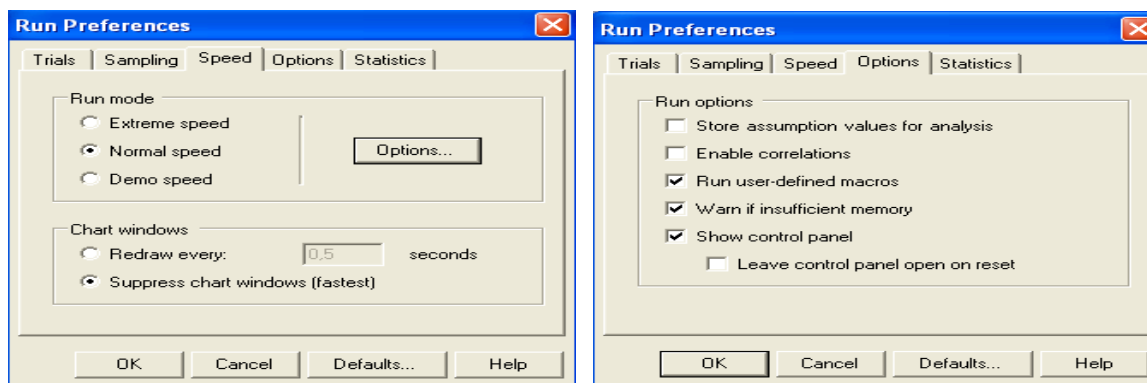


Figure 7. Précision de la vitesse de simulation et les options d'exécution

Après la réalisation de ces étapes, nous obtenons un modèle de simulation pour notre système de stock avec transshipment. Cependant, la simulation ne nous permet pas de trouver les seuils optimaux de stock minimisant le coût total. Il nous faut alors intégrer une phase d'optimisation qui est l'objet de la section suivante.

3.2 Modèle d'optimisation

Nous avons poursuivi les étapes suivantes pour définir le modèle d'optimisation :

- 5- Définir les cellules des variables de décision (decision cells) qui représentent, pour chaque détaillant, le point de commande et le niveau de reapprovisionnement. Chaque variable de décision est déterminée par une borne inférieure, une borne supérieure et un pas de discrétisation (cf. Figure 8) ;

A la fin de ces étapes (1-5), nous obtenons le modèle du système de stock de deux détaillants avec transshipment comme le montre le tableau 1. Pour des raisons de clarté, nous avons limité la présentation du modèle à 10 périodes seulement et ces afin de visualiser les mouvements du transshipment.

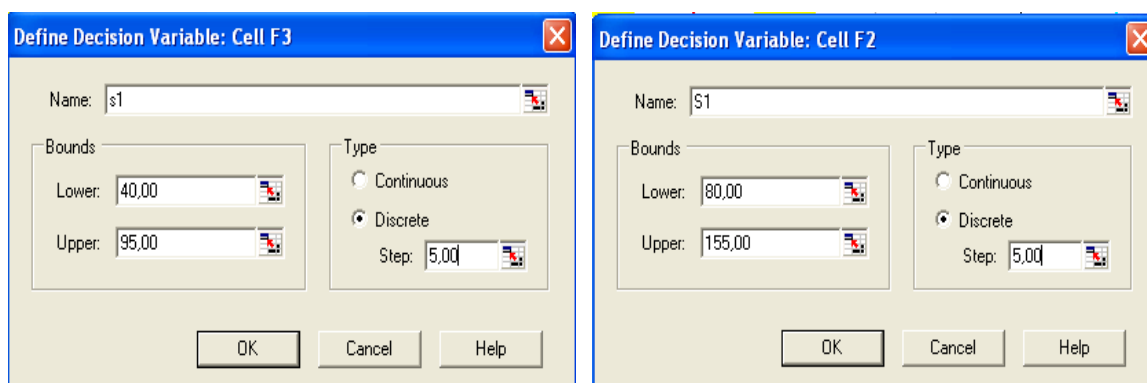


Figure 8. Déclaration des variables de décision pour le détaillant 1

- 6- Lancer l'optimisation par « OptQuest » afin de déterminer la meilleure combinaison des couples (s_i, S_i) qui conduit au coût total minimum tout en satisfaisant le taux de service désiré. La procédure de l'outil OptQuest se déroule en quatre étapes :

- l'étape 1 spécifie les variables de décision programmées dans le modèle tableur Excel (cf. Figure 9),
- l'étape 2 spécifie les contraintes du modèle ; dans notre cas, nous n'avons aucune contrainte entre les variables de décision,
- l'étape 3 indique la fonction objectif à optimiser (coût total) et le critère à satisfaire en indiquant au moins une borne (taux de service) (cf. Figure 10),
- l'étape 4 permet de spécifier le nombre maximum de simulations à effectuer l'OptQuest (cf. Figure 11). Nous avons choisi d'effectuer 1000 simulations pour déterminer 2 ou 4 variables de décision et 2000 simulations pour 8 ou 12 variables. Notre choix s'est basé sur le guide donné dans (Evans et al. 04) (cf. Tableau 2).

Variables de décision	Nombre minimum de simulations
Moins que 10	100
Entre 10 et 20	500
Entre 20 et 50	2000
Entre 50 et 100	5000

Tableau 2. Nombre minimum de simulations pour déterminer un nombre donné de variables de décision

A la fin de cette étape, nous sauvegardons, dans le modèle tableur Excel, la meilleure solution obtenue par l'OptQuest.

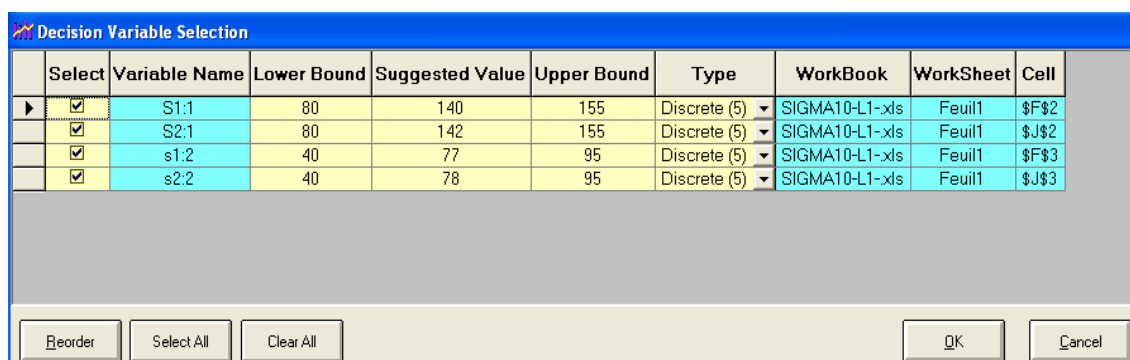


Figure 9. Fenêtre représentant les variables de décision (étape 1)

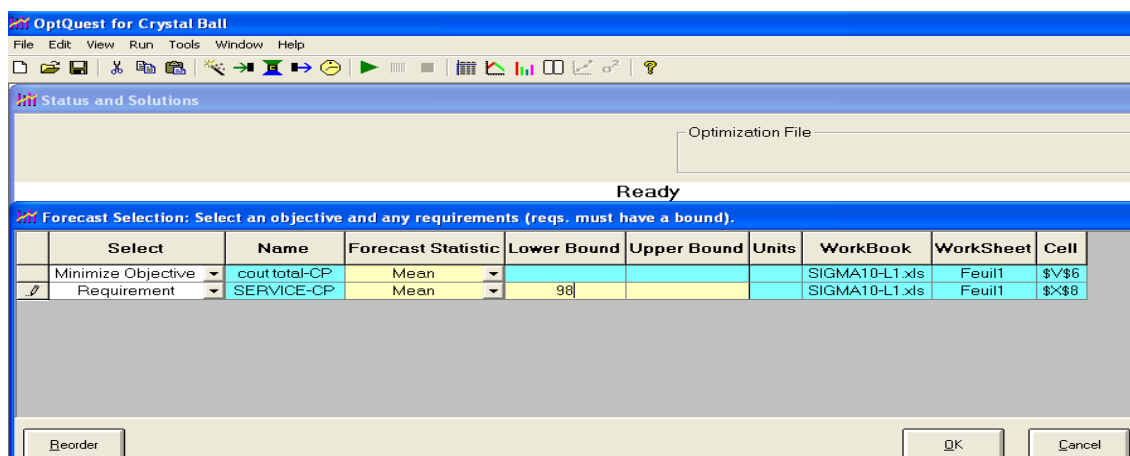


Figure 10. Fenêtre définissant l'objectif visé (étape 3)

S1	140	S2	142	coût de commande	100,00 €	coût total	19 671,00 €	Légende :	 	Assumption cell
s1	77	s2	78	Coût de possession	1,00 €	Taux de service	99,73		 	Forecast cell
L1	1	L2	1	coût de rupture	25,00 €	%TR	4,63		 	Decision variable cell
Sigma_1	10	sigma_2	10	coût de transshipment	10,00 €					
Mu 1	40	mu 2	40							

Détailant 1

Période	Position de stock au début	Niveau de stock au début	Arrivée de cmd	Cmd reçue	Dmd	Dmd nombre entier	Niveau de stock à la fin	Passation de cmd	Quantité de cmd	Position de stock à la fin	Période programmée de la cmd	Quantité de rupture	TR D2?	Quantité de transsh D2	Quantité perdue	Coût de transsh	Coût de possession	Coût de rupture	Coût de commande	Coût total
1	140	140			48,18	48	92	FAUX	0	92	0	0	FAUX	0	0	0,00 €	92,00 €	0,00 €	0,00 €	92,00 €
2	92	92	FAUX	0	39,88	40	52	VRAI	88	140	4	0	FAUX	0	0	0,00 €	52,00 €	0,00 €	100,00 €	152,00 €
3	140	52	FAUX	0	21,06	21	31	FAUX	0	119	0	0	FAUX	0	0	0,00 €	31,00 €	0,00 €	0,00 €	31,00 €
4	119	31	VRAI	88	42,44	42	57	VRAI	83	140	6	0	FAUX	0	0	0,00 €	57,00 €	0,00 €	100,00 €	157,00 €
5	140	57	FAUX	0	59,78	60	0	FAUX	0	83	0	3	VRAI	3	0	30,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	30,00 €
6	83	0	VRAI	83	55,53	56	27	VRAI	113	140	8	0	FAUX	0	0	0,00 €	27,00 €	0,00 €	100,00 €	127,00 €
7	140	27	FAUX	0	54,66	55	0	FAUX	0	113	0	28	VRAI	16	12	160,00 €	0,00 €	300,00 €	0,00 €	460,00 €
8	113	0	VRAI	113	40,76	41	72	VRAI	68	140	10	0	FAUX	0	0	0,00 €	72,00 €	0,00 €	100,00 €	172,00 €
9	140	72	FAUX	0	29,38	29	43	FAUX	0	111	0	0	FAUX	0	0	0,00 €	43,00 €	0,00 €	0,00 €	43,00 €
10	111	43	VRAI	68	49,35	49	62	VRAI	78	140	12	0	FAUX	0	0	0,00 €	62,00 €	0,00 €	100,00 €	162,00 €

Détailant 2

Période	Position de stock au début	Niveau de stock au début	Arrivée de cmd	Cmd reçue	Dmd	Dmd nombre entier	Niveau de stock à la fin	Passation de cmd	Quantité de cmd	Position de stock à la fin	Période programmée de la cmd	Quantité de rupture	TR D1?	Quantité de transsh D1	Quantité perdue	Coût de transsh	Coût de possession	Coût de rupture	Coût de commande	Coût total
1	142	142			17,78	18	124	FAUX	0	124	0	0	FAUX	0	0	0,00 €	124,00 €	0,00 €	0,00 €	124,00 €
2	124	124	FAUX	0	37,61	38	86	FAUX	0	86	0	0	FAUX	0	0	0,00 €	86,00 €	0,00 €	0,00 €	86,00 €
3	86	86	FAUX	0	52,31	52	34	VRAI	108	142	5	0	FAUX	0	0	0,00 €	34,00 €	0,00 €	100,00 €	134,00 €
4	142	34	FAUX	0	54,33	54	0	FAUX	0	108	0	20	VRAI	20	0	200,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	200,00 €
5	108	0	VRAI	108	26,35	26	79	FAUX	0	79	0	0	FAUX	0	0	0,00 €	79,00 €	0,00 €	0,00 €	79,00 €
6	79	79	FAUX	0	27,38	27	52	VRAI	90	142	8	0	FAUX	0	0	0,00 €	52,00 €	0,00 €	100,00 €	152,00 €
7	142	52	FAUX	0	36,4	36	0	FAUX	0	90	0	0	FAUX	0	0	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
8	90	0	VRAI	90	19,69	20	70	VRAI	72	142	10	0	FAUX	0	0	0,00 €	70,00 €	0,00 €	100,00 €	170,00 €
9	142	70	FAUX	0	43,81	44	26	FAUX	0	98	0	0	FAUX	0	0	0,00 €	26,00 €	0,00 €	0,00 €	26,00 €
10	98	26	VRAI	72	21,78	22	76	VRAI	66	142	12	0	FAUX	0	0	0,00 €	76,00 €	0,00 €	100,00 €	176,00 €

Tableau 1. Modèle tableur Excel d'un système de stock avec transshipment de deux détaillants identiques en coûts, demandes et délais

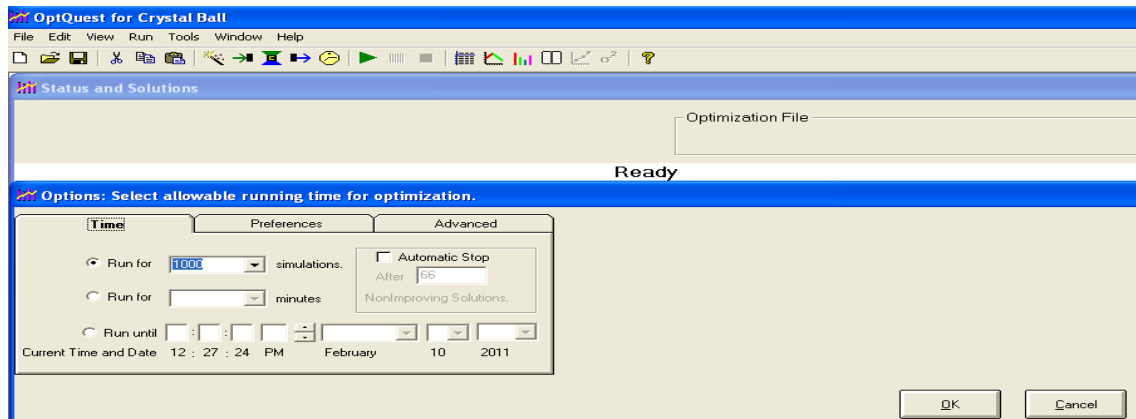
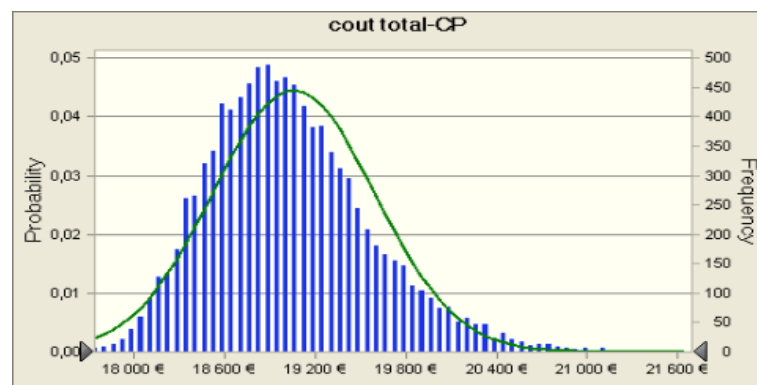


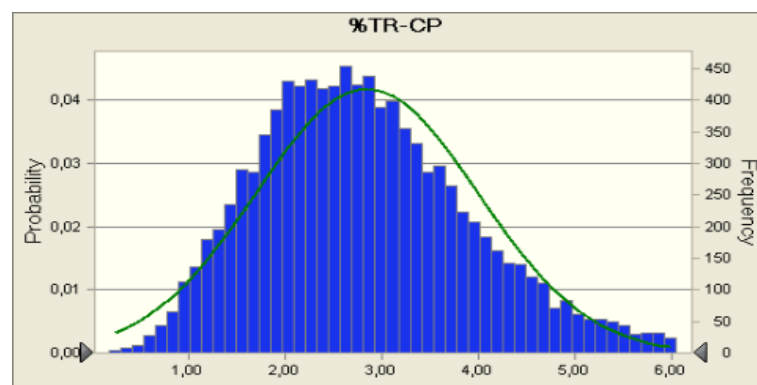
Figure 11. Fenêtre représentant la limite de l'exécution de la simulation (étape 4)

7- Enfin, nous exécutons la meilleure solution obtenue par la simulation de Monte Carlo en effectuant 10 000 essais afin d'obtenir des estimations plus exactes. Crystal Ball crée ensuite un rapport de résultats dans lequel les mesures de performance sont représentées sous forme de diagrammes et de mesures statistiques (cf. Figures 12-14).



La courbe en vert représente la distribution normale

Figure 12. Diagramme de distribution du coût total en fonction de la variation aléatoire des demandes clients



La courbe en vert représente la distribution normale

Figure 13. Diagramme de distribution du taux de transshipment en fonction de la variation aléatoire des demandes clients

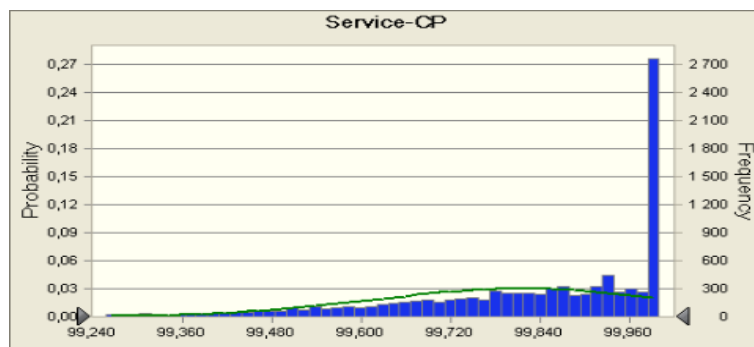


Figure 14. Diagrammes de distribution du taux de service en fonction de la variation aléatoire des demandes clients

4. Comparaison entre deux systèmes de stock

En nous basant sur (Glover et al. 98), nous avons procédé à l'exécution de la simulation de Monte Carlo sur 10 000 essais pour les systèmes sans transshipment et avec transshipment. Dans notre étude, nous nous sommes intéressé seulement à la valeur moyenne d'une mesure de performance. Nous avons utilisé l'option « overlay Charts » de Crystal Ball qui nous permet d'illustrer les différences en mesures de performance entre les deux systèmes (cf. Figures 15-16).

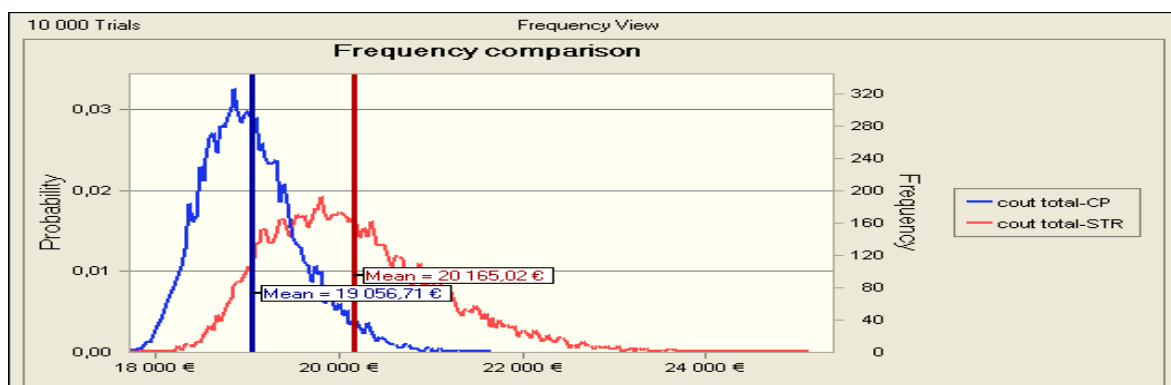


Figure 15. Comparaison du coût total entre un système sans transshipment et le complete pooling

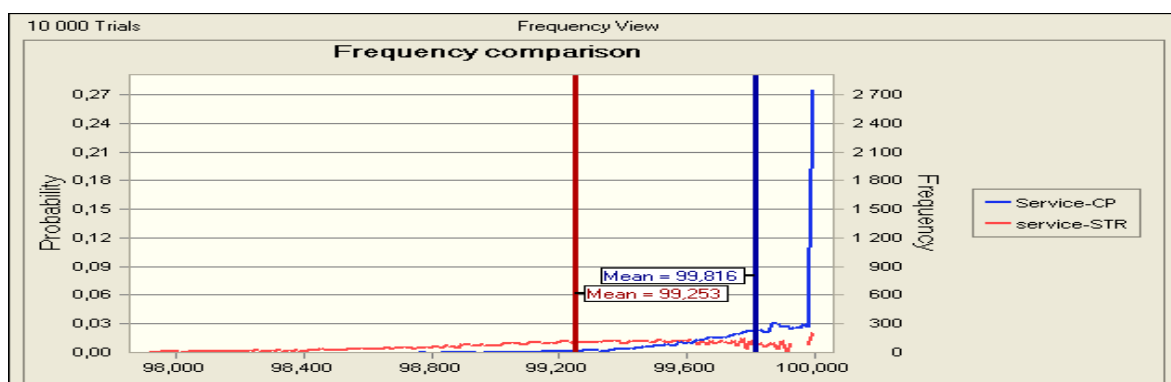


Figure 16. Comparaison du taux de service entre un système sans transshipment et le complete pooling

Références bibliographiques

- (Allen 61) Allen S.G. A redistribution model with set-up charge. *Management Science*, 1961, vol. 1, p 99-108.
- (Allen 62) Allen S.G. Computation for the redistribution model with set-up charge. *Management Science*, 1962, p 482-489.
- (Aneja et Noori 87) Aneja Y. The optimality of (s, S) policies for a stochastic inventory problem with proportional and lump-sum penalty cost. *Management Science*. 1987, vol. 33, n° 6, p 750-755.
- (Archibald 81) Archibald B.C. Continuous review (s, S) policies with lost sales. *Management Science*, 1981, vol. 27, n° 10, p 1171-1177.
- (Archibald et al. 97) Archibald T.W., Sassen S.A.E., Thomas L.C. An optimal policy for a two-depot inventory problem with stock transfer. *Management Science*, 1997, vol. 43, n°2, p 173-183.
- (Archibald et al. 09) Archibald T.W., Blacka D., Glazebrook K.D. An index heuristic for transshipment decisions in multi-location inventory systems based on a pairwise decomposition. *European Journal of Operational Research*, 2009 vol. 192, n° 1, p 69-78.
- (Axsäter 90) Axsäter S. Modelling emergency lateral transshipments in inventory systems. *Management Science*, 1990, vol. 36, n°11, p 1329-1338.
- (Axsäter et Rosling 93) Axsäter S., Rosling K. Installation vs.. Echelon Stock Policies for Multilevel Inventory Control. *Management Science*, 1993, vol. 39, n° 10, p 1274-1280.
- (Axsäter 97) Axsäter S. Simple evaluation of echelon stock (R,Q) policies for two-level inventory systems. *IIE Transactions*, 1997, vol. 29, p 661-669.
- (Axsäter et Juntti 97) Axsäter S., Juntti L. Comparison of echelon stock and installation stock policies with policy adjusted order quantities. *Int. J. Production Economics*, 1997, p 48, 1-6.
- (Axsäter 03a) Axsäter S. Evaluation of unidirectional lateral transshipments and substitutions in inventory systems. *European Journal of Operational Research*, 2003, vol. 149, p 438-447.
- (Axsäter 03b) Axsäter S. A New Decision Rule for Lateral Transshipments in Inventory Systems. *Management Science*, 2003, vol. 49, n° 9, p 1168-1179.
- (Axsäter 03c) Axsäter S. Supply chain operations: serial and distribution inventory systems. A. G. de Kok and S. C. Graves, Eds., *Handbooks in OR & MS*, Vol. 11, Elsevier, 2003.
- (Axsäter et al. 04) Axsäter S., Kleijn M., de Kok T.G. Stock rationing in a continuous review two-echelon inventory model. *Annals of Operations Research*, 2004, vol. 126, p 177-194.
- (Axsäter 05) Axsäter S. A simple procedure for determining order quantities under a fill rate constraint and normally distributed lead-time demand. *European Journal of Operational Research*, 2006, vol. 174, n° 1, p 480-491.

- (Ball et al. 00) Ball M.O., Chen C.Y., Zhao Z.Y. Available to promise. Working paper, Robert H Smith School of Business, University of Maryland, College Park, 2000.
- (Ball et al. 02) Ball M.O., Chen C.Y., Chen M., Rashid L., Zhao Z. Scalable supply chain infrastructures: system integration and embedded decision models. Working paper, Robert H Smith School of Business, University of Maryland, College Park, 2002.
- (Baganha et al. 96a) Baganha M.P., Pyke D.F., Ferrer G. The undershoot of the re-order point: Tests of an approximation. *International Journal of Production Economics*, 1996, vol. 45, p 311-320.
- (Baganha et al. 96b) M.P. Baganha, D.F. Pyke, G. Ferrer. The residual life of the renewal process: a simple algorithm. Working paper, University Nova de Lisbon, Portugal, 1996.
- (Banerjee et al. 03) Banerjee A., Burton J., Banerjee S. A simulation study of lateral shipments in single supplier, multiple buyers supply chain networks. *Int. J. Production Economics*, 2003, vol. 81-82, p 103-114.
- (Bertrand et Bookbinder 98) Bertrand L.P., Bookbinder J.H. Stock Redistribution in Two-Echelon Logistics Systems. *The Journal of the Operational Research Society*, 1998, vol. 49, n° 9, p 966-975.
- (Bertazzi et al. 05) Bertazzi L., Paleta G., Speranza M.G. Minimizing the total cost in integrated Vendor-Managed Inventory system. *Journal of Heuristics*, 2005, vol. 11, p 393-419.
- (Burton et Banerjee 05) Burton J., Banerjee A. Cost-parametric analysis of lateral transshipment policies in two-echelon supply chains. *International Journal of Production Economics*, 2005, vol. 93-94, p 169-178.
- (Chiou 08) Chiou Chuang-Chun. Chapter 21: Transshipment Problems in Supply Chain Systems: Review and Extensions. **In:** *Supply Chain, Theory and Applications*, ISBN 978-3-902613-22-6, 2008, p 427-448.
- (Chen et al. 01) Chen C.Y., Zhao Z.Y., Ball M.O. Scalable supply chain infrastructures: system integration and embedded decision models. *Information Systems Frontiers*, 2001, vol. 3, n° 4, p 477-488.
- (Clark et Scarf 60) Clark A.J., Scarf H. Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem. *Management Science*, 1960, vol. 6, n° 4, p 475-490.
- (Clay 90) Clay P. Advanced available to promise: concepts/techniques. American Production & Inventory control Society, conference proceeding CFPIM, 1990.
- (Cohen et al. 88) Cohen M.A., Kleindorfer P.R., Lee H.L. Service constrained (s, S) inventory systems with priority demand classes and lost sales. *Management Science*, 1988, vol. 34, n° 4, p 482-499.
- (Dada 92) Dada M. A two-echelon inventory system with priority shipments. *Management Science*, 1992, vol. 8, p 1140-1155.
- (Das 75) Das C. Supply and redistribution rules for two-location inventory systems: one period analysis. *Management Science*, 1975, vol. 21, n° 7, p 765-776.
- (Diks et De Kok 96) Diks E.B., de Kok A.G. Controlling a divergent 2-echelon network with transshipments using the consistent appropriate share rationing policy. *International Journal of Production Economics*, 1996, vol. 45, p 369-379.
- (Diks et de Kok 99) Diks E.B., de Kok A.G. Computational results for the control of a divergent N-echelon inventory system. *Int. J. Production Economics*, 1999, vol. 59, p 327-336.
- (Dupont 98) Dupont L. *La gestion industrielle*. Hermès, Paris, 1998.
- (Dirk 07) Dirk J. Monte Carlo simulation as process control aid. *Proceedings of the 2007 Crystal Ball User Conference*, 2007, 9 p.
- (Ehrhardt et Mosier 84) Ehrhardt R., Mosier C. A Revision of the Power Approximation for Computing (s, S) Policies. *Management Science*, 1984, vol. 30, n° 5, p 618-622.

- (Ehrhardt 84) Ehrhardt R. (s, S) Policies for a Dynamic Inventory Model with Stochastic Lead Times. *Operations Research*, 1984, vol. 32, n° 1, p 121-132.
- (Ekren et Sunderesh 08) Ekren B.Y., Sunderesh S. H. Simulation based optimization of multi-location transshipment problem with capacitated transportation. *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, 2008, p 2632-2638.
- (Eppen et Schrage 81) Eppen G., Schrage L. Centralized ordering policies in a multi-warehouse system with lead times and random demand. *Management Science*, 1981, vol. 16, p 51-67.
- (Evers 01) Evers P. T. Heuristics for assessing emergency transshipment. *European Journal of Operational Research*, 2001, vol. 129, p 311-316.
- (Evans et Olson 98) Evans J.R., Olson D. Inventory simulation with lost sales. *In : Introduction to simulation and risk analysis*, New York, Prentice-Hall, 1998.
- (Evans 00) Evans J.R. Spreadsheets as a tool for teaching simulation. *INFORMS Transactions on Education*, 2000, vol. 1, n° 1, 13 p.
- (Evans et al. 04) Evans J.R., Wainwright E., Gentry B., Blankinship D. OptQuest® 2.3 for Crystal Ball User's Guide. Decisioneering Inc. Denver, CO and Optimization Technologies, Inc. Boulder, ©1988-2004. 190 p.
- (Federgruen et Zipkin 84) Federgruen A., Zipkin P. An Efficient algorithm for Computing Optimal (s, S). *Operations Research*, 1984, vol. 32, p 1268-1285.
- (Federgruen et Zipkin 85) Federgruen A., Zipkin P. Computing Optimal (s, S) policies in inventory models with continuous demands. *Advances in Applied Probability*, 1985, vol. 17, n° 2, p 424-442.
- (Feldman 78) Feldman R.M. A continuous review (s, S) inventory system in a random environment. *J. Appl. Prob.*, 1978, vol. 15, p 654-659.
- (Freeland et Porteus 80) Freeland J.R., Porteus E.L. Evaluating the Effectiveness of a New Method for Computing Approximately Optimal (s, S) Inventory Policies. *Operations Research*, 1980, vol. 28, n° 2, p 353-364.
- (Fu 94) Fu M.C. Sample path derivatives for (s, S) inventory systems. *Operations Research*, 1994, vol. 42, n° 2, p 351-364.
- (Fu et Healy 97) Fu M.C., Healy K.J. Techniques for optimisation via simulation: an experimental study on an (s, S) inventory system. *IIE Transactions*, 1997, vol. 29, p 191-199.
- (Geunes et al. 01) Geunes J.P., Ramasesh R.V., Hayya J.C. Adapting the newsvendor model for infinite-horizon inventory systems. *Int. J. Production Economics*, 2001, vol. 72, p 237-250.
- (Goldman 03) Goldman L. I., Evans-Hilton E., Emmett H. Crystal Ball for six sigma tutorial. *Proceedings of 2003 the Winter Simulation Conference*, 2003, p 293-300.
- (Graves 85) Graves S.C. A multi-echelon inventory model for a repairable item with one-for-one replenishment. *Management Science*, 1985, vol. 31, n° 10, p 1247-1257.
- (Gross et Harris 73) Gross D., Harris C.M. Continuous review (s, S) inventory models with state-dependent leadtimes. *Management Science*, 1973, vol. 19, n° 5, p 567-574.
- (Gentry 05a) Gentry B., Wainwright E., Blankinship D. Crystal Ball® 7.2 Getting Started Guide. © 1988-2005, Decisioneering, Inc. 118 pages.
- (Gentry 05b) Gentry B., Wainwright E., Blankinship D. Crystal Ball® 7.2 User Manual. © 1988-2005, Decisioneering, Inc. 392 pages.
- (Gentry 05c) Gentry B., Wainwright E., Blankinship D. Crystal Ball® 7.2 Reference Manual. © 1988-2005, Decisioneering, Inc. 74 pages.
- (Glover 77) Glover F. Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*, 1977, vol. 8, p 156-166.
- (Glover 86) Glover F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Comput. Oper. Res.*, 1986, vol. 13, n° 5, p 533-549.

- (Glover et Laguna 93) Glover F., Laguna M. Tabu search. In *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Optimization*, ed. C. Reeves, 1993, 60-150. Blackwell Publishers: Oxford.
- (Glover 96) Glover F. Tabu search and adaptive memory programming. *Advances, applications and challenges. Interfaces in Computer Science and Operations Research*, eds. Barr, Helgason and Kennington, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- (Glover et al. 98) Glover F., Kelly J.P., Laguna M. The OptQuest approach to Crystal Ball simulation optimization. Working paper, Graduate School of Business Administration University of Colorado, 1998, p 1-12.
- (Herer et Rashit 99) Herer Y.T., Rashit A. Lateral Stock Transshipments in a Two-Location Inventory System with Fixed and Joint Replenishment Costs. *Naval Research Logistics*, 1999, vol. 46, p 525-545.
- (Herer et Tzur 01) Herer Y.T., Tzur M. The Dynamic Transshipment Problem. *Naval Research Logistics*, 2001, vol. 48, p 386-408.
- (Herer et al. 02) Herer Y.T., Tzur M., Yücesan E. Transshipments: An emerging inventory recourse to achieve supply chain leagility. *International Journal of production economics*, 2002, vol. 80, p 201-212.
- (Herer et Tzur 03) Herer Y.T., Tzur M. Optimal and heuristic algorithms for the multi-location dynamic transshipments problem with fixed transshipment costs. *IIE Transactions*, 2003, vol. 35, p 419-432.
- (Herer et al. 04) Herer Y.T., Tzur M., Yücesan E. The multi-location transshipment problem. Working paper, 2004.
- (Hill et Johansen 06) Hill R.M., Johansen S.G. Optimal and near-optimal policies for lost sales inventory models with at most one replenishment order outstanding. *European Journal of Operational Research*, 2006, vol. 169, p 111–132.
- (Hu et al. 05) Hu J., Watson E., Schneider H. Approximate solutions for multi-location inventory systems with transshipments. *International Journal of production economics*, 2005, vol. 97, p 31-43.
- (Iyer et Schrage 92) Iyer A. V., Schrage L.E. Analysis of the deterministic (s, S) inventory problem. *Management Science*, 1992, vol. 38, n° 9, p 1299-1313.
- (Janssen et al. 98) Janssen F., Heuts R., de Kok T. On the (R, s, Q) inventory model when demand is modelled as a compound Bernoulli process. *European Journal of Operational Research*, 1998, vol. 104, p 423-436.
- (Jeong et al. 02) Jeong B., Sim S.B., Jeong H.S., Kim S. W. An available-to-promise system for TFT LCD manufacturing in supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 2002, vol. 43, p 191-212.
- (Johansen et Hill 00) Johansen S., Hill R. The (r,Q) control of a periodic-review inventory system with continuous demand and lost sales. *Int. J. Production Economics*, 2000, vol. 68, p 279-286.
- (Johnson 68) Johnson E.L. On (s, S) policies. *Management Science*, 1968, vol. 33, n° 2, p 215–227.
- (Jonsson et Silver 87) Jonsson H., Silver E.A. Analysis of a two-echelon inventory control system with complete redistribution. *Management Science*, 1987, vol. 33, n° 2, p 215–227.
- (Karmarkar 87) Karmarkar U.S. The multi location multi period inventory problem: bounds and approximations. *Management Science*, 1987, vol. 33, n° 1, p 86-94.
- (Kaplin 70) Kaplin R.S. A dynamic inventory model with stochastic lead times. *Management Science*, 1970, vol. 16, p 491-507.
- (Kleijnen et Wan 07) Kleijnen Jack P.C., Wan J. Optimization of simulated systems: OptQuest and alternatives. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2006, vol. 15, p 354-362.

- (Kilger et Schneeweiss 00) Kilger C., Schneeweiss L. Chapter 8: Demand fulfilment and ATP. **In** : Supply chain management and advanced planning: concept, models, software and cases studies. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2000.
- (Kiesmüller et de Kok 06) Kiesmüller G.P., de Kok A.G. The customer waiting time in an (R, s, Q) inventory system. *Int. J. Production Economics*, 2006, vol. 104, p 354–364.
- (Kim et Park 85) Kim D. H., Park K.S. (Q, r) Inventory Model with a Mixture of Lost Sales and Time-Weighted Backorders. *The Journal of the Operational Research Society*, 1985, vol. 36, n° 3, p 231-238.
- (Krishnan et Rao 65) Krishnan K., Rao V. Inventory control in N warehouses. *Journal of Industrial Engineering*, 1965, vol. XVI, p 212-215.
- (Kruse 81) Kruse W.K. Waiting Time in a Continuous Review (s, S) Inventory System with Constant Lead Times. *Operations Research*, 1981, vol. 29, n° 1, p 202-207.
- (Kurkreja et Schmidt 05) Kukreja A., Schmidt C.P. A model for lumpy demand parts in a multi-location inventory system with transshipments. *Computers & operations research*, 2005, vol. 32, p 2059-2075.
- (Larsen et Kiesmüller 06) Larsen C., Kiesmüller G.P. Developing a closed form cost expression for an (R, s, nQ) policy where the demand process is compound generalized Erlang. *Logistics/SCM, Working paper*, n° L-2006-09, 2006.
- (Lasanier 04) Lasanier G. Gestion des approvisionnements et des stocks dans une chaîne logistique. Lavoisier, 2004.
- (Laguna 97) Laguna M. Optimization of Complex Systems with OptQuest. Working paper, Graduate School of Business Administration University of Colorado, 1997, p 1-13.
- (Lee 87) Lee H.L. A multi-echelon inventory model for repairable items with emergency transshipments. *Management Science*, 1987, vol. 33, n° 10, p 1302-1316.
- (Lee et Billington 93) Lee H. L., Billington C. Material management in decentralized supply chain. *Operational Research*, 1993, vol. 41, n° 5, p 835-847.
- (Lee et al. 07) Lee Y., Jung J., Jeon Y. An effective lateral transshipment policy to improve service level in the supply chain. *Int. J. Production Economics*, 2007, vol. 106, p 115-126.
- (Minner et al. 03) Minner S., Silver E.A., Robb D.J. An improved heuristic for deciding on emergency transshipments. *European Journal of Operational Research*, 2003, vol. 148, p 384-400.
- (Minner et al. 05) Minner S., Silver E.A. Evaluation of two extreme transshipment strategies. *International Journal of Production Economics*, 2005, vol. 93-94, p 1-11.
- (Morton 71) Morton T.E. The near-myopic nature of the lagged-proportions cost inventory problem with lost sales. *Operations Research*, 1971, vol. 19, p 1708-1716.
- (Moon et Choi 94) Moon I., Choi S. The distribution free continuous review inventory system with a service level constraint. *Computers ind. Engng*, 1994, vol. 27, n° 1-4, p 209-212.
- (Naddor 62) Naddor E. A Comparison of (t, Z) and (z, Z) Policies. *Operations Research*, 1962, vol. 10, n° 3, p 401-403.
- (Nahmias 79) Nahmias P. Simple approximations for a variety of dynamic lead times lost sales inventory models. *Operations Research*, 1979, vol. 27, n° 5, p 907-924.
- (Nahmias et Smith 94) Nahmias P., Smith S.A. Optimizing inventory levels in a two-echelon retailer system with partial lost sales. *Management Science*, 1994, vol. 40, n° 5, p 582-596.
- (Needham et Evers 98) Needham P.M., Evers P.T. The influence of individual cost factors on the use of emergency transshipments. *Transp. Res.-E (Logistics and transp. Rev.)*, 1998, vol. 34, n° 2, p 149-160.

- (Özdemir et al. 06) Özdemir D., Yücesan E. Herer Y.T. Multi-location transshipments problem with capacitated transportation. *European Journal of Operational Research*, 2006, vol. 175, p 602-621.
- (Olssen 09) Olssen F. Optimal policies for inventory systems with lateral transshipments. *International Journal of Production Economics*, 2009, vol. 118, p 175-184.
- (Olssen 10) Olssen F. An inventory model with unidirectional lateral transshipments. *European Journal of Operational Research*, 2010, vol. 200, p 725-732.
- (Paterson et al. 11) Paterson C., Kiesmüller G., Teunter R., Glazebrook K. Inventory models with lateral transshipments: A review. *European Journal of Operational Research*, 2011, vol. 210, p 125–136.
- (Pimor 03) Pimor Y. *Logistique : Production, Distribution, Soutien*. Dunod, Paris, 2003.
- (Porteus 72) Porteus E.L. The optimality of generalized (s, S) policies under uniform demand densities. *Management Science*, 1972, vol. 18, n° 11, p 644-646.
- (Pyke et Cohen 90) Pyke D.F., Cohen M.A. Push hand pull in manufacturing and distribution systems. *Journal of Operational Management*, 1990, vol. 9, n° 1, p 24-43.
- (Richards 75) Richards F.R. Comments on the Distribution of Inventory Position in a Continuous-Review (s,S) Inventory System. *Operations Research*, 1975, vol. 23, n° 2, p 366-371.
- (Rota-Franz et al. 01) Rota-Franz K., Bel G., Thierry C. Gestion des flux dans les chaînes logistiques. Dans *Performance industriel et gestion des flux*, 2001, p 153-187.
- (Robinson 90) Robinson L. Optimal and approximate policies in multi-period, multi-location inventory models with transshipments. *Operations Research*, 1990, vol. 38, p 278-295.
- (Rosling 99) Rosling K. The square-root algorithm for single-item inventory optimization. Lund University, Sweden, Working paper, 1999.
- (Rao et al. 03) Rao A., Paternina C.D., Montoya-Torres J.R. Un modèle de simulation intelligente pour la gestion de stocks. MOSIM 03, du 23 au 25 avril 3003-Toulouse (France). p 160-164.
- (Scarf 59) Scarf H.E. Bayes Solutions of the Statistical Inventory Problem. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1959, vol. 30, n° 2, p 490-508.
- (Scarf 02) Scarf H.E. Inventory theory. *Operations Research*, 2002, vol 50, n°1, p 186-191.
- (Scarf 05) Scarf H.E. Optimal inventory policies when sales are discretionary. *Int. J. Production Economics*, 2005, vol. 93–94, p 111–119.
- (Sahin 79) Sahin I. On the stationary analysis of continuous (s, S) inventory systems with constant lead times. *Operations Research*, 1979, vol. 27, n° 4, p 717-729.
- (Sahin 82) Sahin I. On the objective function behavior in (s, S) inventory models. *Operations Research Letters*, 1982, vol. 30, n° 4, p 709-724.
- (Satyendra et Venkata 05) Satyendra K., Venkata R. Evaluating lateral transshipment policy in a two-echelon inventory system. *Journal of Comparative International Management*, 2005, vol. 8, n° 2, p 12-22.
- (Sherbrooke 68) Sherbrooke C.C. METRIC: Multi Echelon Technique for Recoverable Item Control. *Management Science*, 1968, vol. 16, n° 1, p 122–141.
- (Schneider 78) Schneider H. Methods for Determining the Re-order Point of an (s, S) Ordering Policy when a Service Level is Specified. *The Journal of the Operational Research Society*, 1978, vol. 29, n° 12, p 1181-1193.
- (Schneider 79) Schneider H. The service level in inventory control system. *Engineering and Process Economics*, 1979, vol. 4, p 341-348.
- (Schneider et Ringuest 90) Schneider H., Ringuest J.L. Power approximation for computing (s, S) inventory policies using service level. *Management Science*, 1990, vol. 36, n° 7, p 822- 834.
- (Schneider et Rinks 91) Schneider H., Rinks D.B. Empirical study of a new procedure for allocating safety stock in a wholesale inventory system. *International Journal of Production Economics*, 1991, vol. 24, p 181- 189.

- (Sethi et Cheng 97) Sethi S.P., Cheng F. Optimality of (s, S) policies in inventory models with markovian demand. *Operations Research*, 1997, vol. 45, n° 6, p 931-939.
- (Seila 05) Seila A. F. Spreadsheet simulation. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, 2005, p 33-40.
- (Silver et al. 98) Silver E.A., Pyke D.F., Peterson R. *Inventory management and production planning and scheduling*. John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- (Sripathomswat 08) Sripathomswat K.. *Comparison of different policies in a logistic network : product-location problem*. Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, 2008.
- (Tagaras et Cohen 92) Tagaras G., Cohen M.A. Pooling in two-location inventory systems with non-negligible replenishment lead times. *Management Science*, 1992, vol. 38, n° 8, p 1067-1083.
- (Tagaras 99) Tagaras G. Pooling in multi-location periodic inventory distribution system. *The International Journal of Management Science*, 1999, vol. 27, p 39-59.
- (Tempelmeier 00) Tempelmeier H. Inventory service levels in the customer supply chain. *OR Spectrum*, 2000, vol. 22, p 361-380.
- (de Terssac et Maggi 96) de Terssac G., Maggi B. *Autonomie et conception*. Dans *Coopération et conception sous la direction de G. de Terssac et E. Friedberg*, 1996, p 243-266. Octares Editions.
- (Tlili et al. 07) Tlili M., Campagne J.P., Bahroun Z. Nouvelles approches d'optimisation d'un système de distribution multi échelons intégrant le transshipment. *7e Congrès international de génie industriel (CIGI'07) – 5-8 juin 2007 – Trois-Rivières, Québec (CANADA)*, 2007, 12 p.
- (Tlili et al. 08a) Tlili M., Moalla M., Campagne J.P., Bahroun Z. Un modèle basé simulation-optimisation pour un système de distribution à deux stocks intégrant le transshipment. *7e Conférence Internationale de MODélisation et SIMulation (MOSIM'08)*, March 31 - April 2, Paris, France, 2008, 9 p, Proceeding p. 1240-1248.
- (Tlili et al. 08b) Tlili M., Moalla M., Campagne J.P., Bahroun Z. A simulation-optimization model for two-echelon, multi-location inventory system with transshipment and lost sales. *2nd International Conference on Information system, Logistics and Supply chain (ILS 2008)*, 26-28 Mai aux états unis, 2008, 11 p.
- (Tlili et al. 08c) Tlili M., Moalla M., Campagne J.P., Bahroun Z. Assessing pooling policies in multi-retailer inventory system with lost sales. *20th European Modeling and Simulation Symposium (EMSS08)*, Biatico, Italy, September 17-19, 2008, 8 p.
- (Tlili et al. 10a) Tlili M., Moalla M., Campagne J.P., Bahroun Z. The transshipment problem in a multi-echelon inventory system with lost sales. *3rd International Conference on Information system, Logistics and Supply chain (ILS 2010)*, 14-16 avril à Casablanca (Morocco), 2010, 10 p.
- (Tlili et al. 10b) Tlili M., Moalla M., Campagne J.P., Bahroun Z. Gestion de stocks avec transshipment dans un réseau de distribution multi échelons. *8e Conférence Internationale de MODélisation et SIMulation (MOSIM'10)*, 10 au 12 mai 2010 - Hammamet - Tunisie, 2010, 10 p.
- (Thomassen et Lorenzen 01) Thomassen M. A., Lorenzen M. The dynamic costs of coordination and specialization: production activities and learning processes in the Danish construction and furniture industries. *DRUID Nelson and winter conference*, Aalborg, 12-15 June, 2001, 25 p.
- (Tsay et al. 99) Tsay A.A., Nahmias S., Agrawal N. *Modeling Supply Chain Contracts: A review*, in: *Quantitative Models for Supply Chain Management*. Kluwer Academic Publishers, Boston, p 299-336
- (Veinott et Wagner 65) Veinott A.F., Wagner H.M. Computing optimal (s, S) inventory policies. *Management Science*, 1965, vol. 11, n° 5, p 525-552.

- (Veinott 66) Veinott A.F. On Finding Optimal Policies in Discrete Dynamic Programming with No Discounting. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1966, vol. 37, n° 5, p 1284-1294.
- (Veramani et Joshi 97) Veramani D., Joshi P. Methodologies for rapid and effective response to requests for quotation (RFQs). *IIE Transactions*, 1997, vol. 29, p 825-838.
- (Viswanathan 97) Viswanathan S. Note. Periodic review (s, S) policies for joint replenishment inventory systems. *Management Science*, 1997, vol. 43, n° 10, p 1447-1454.
- (Wagner et al. 65) Wagner H.M., O'hagan M., Lundh B. An empirical study of exact and approximately optimal inventory policies. *Management Science*, 1965, vol. 11, n° 7, p 690-723.
- (Wilson 34) Wilson R. A scientific routine for stock control. *Harvard Business Review*, 1934, vol. 13, n° 2, p 116-128.
- (Wong et al. 05) Wong H., Cattrysse D., Oudheusden D.V. Inventory pooling of repairable spare parts with non-zero lateral transshipment time and delayed lateral transshipments. *European Journal of Operational Research*, 2005, vol. 165, p 207-218.
- (Xiong et al. 03) Xiong M., Tor S.B., Khoo L.P., Chen C.H. A web-enhanced dynamic BOM-based available-to-promise system. *International Journal of Production Economics*, 2003, vol. 84, p 133-147.
- (Xu 97) Xu K. A multi-location continuous review (Q, R) inventory model with emergency transshipments. PhD dissertation, University of Maryland, 1997, 184 p.
- (Xu et al. 03) Xu K., Evers P.T., Fu M.C. Estimating customer service in a two-location continuous review inventory model with emergency transshipments. *European Journal of Operational Research*, 2003, vol. 145, p 569-584.
- (Yao et al. 07) Yao Y., Evers P.T. et Dresner M.E. Supply chain integration in Vendor-Managed Inventory. *Decision Support Systems*, 2007, vol. 43, p 663-674.
- (Zabel 62) Zabel E. A note on the optimality of (S, s) policies in inventory theory. *Management Science*, 1962, vol. 43, n° 1, p 123-125.
- (Zabawa et Mielczarek 07) Zabawa J., Mielczarek B. Tools of Monte Carlo simulation in inventory management problems. *Proceedings 21st European Conference on Modelling and Simulation (ECMS)*, 2007, ISBN 978-0-9553018-2-7 / ISBN 978-0-9553018-3-4 (CD), 6 p.
- (Zhang et al. 01) Zhang R.Q., Hopp W.J., Supatgiat C. Spreadsheet Implementable Inventory Control for a Distribution Center. *Journal of Heuristics*, 2001, vol. 7, p 185–203.
- (Zheng et Federgruen 91) Zheng Y.S., Federgruen A. Finding optimal (s, S) policies is about as simple as evaluating a single policy. *Operations Research*, 1991, vol. 39, n° 4, p 654-665.
- (Zheng 92) Zheng Y. On proprieties of stochastic inventory systems. *Management science*, 1992, vol. 38. n° 1, p 87-103.